



市民ランナーにおけるマラソンレース後の生理学的・パフォーマンス指標の回復

著者	?山 史徳
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
発行年	2018
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8735号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00153500

博士論文

市民ランナーにおけるマラソンレース後の
生理学的・パフォーマンス指標の回復

平成 29 年度

高山 史徳

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 体育科学専攻

目次

I. 緒言	・ ・ ・ 1
II. 文献研究	
1) マラソンレースの記録を決定する生理学的指標	・ ・ ・ 4
2) 筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響	・ ・ ・ 10
3) マラソンレース後の筋損傷, 生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復	・ ・ ・ 18
III. 研究課題の設定	
1) 問題点	・ ・ ・ 26
2) 研究課題の設定	・ ・ ・ 27
IV. 研究課題 1	
マラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響	
1) 目的	・ ・ ・ 29
2) 方法	・ ・ ・ 29
3) 結果	・ ・ ・ 33
4) 考察	・ ・ ・ 37
5) まとめ	・ ・ ・ 42
V. 研究課題 2	
マラソンレース後の筋損傷の回復における筋間差と 筋損傷から回復した直後の生理学的指標およびパフォーマンス指標	
1) 目的	・ ・ ・ 43
2) 方法	・ ・ ・ 43
3) 結果	・ ・ ・ 46
4) 考察	・ ・ ・ 50
5) まとめ	・ ・ ・ 52

VI. 研究課題 3

マラソンレース 1 週間後における生理学的指標およびパフォーマンス指標

1) 目的	・ ・ ・ 53
2) 方法	・ ・ ・ 53
3) 結果	・ ・ ・ 56
4) 考察	・ ・ ・ 58
5) まとめ	・ ・ ・ 59

VII. 研究課題 4

様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有するランナー
におけるマラソンレース後の筋痛

1) 目的	・ ・ ・ 60
2) 方法	・ ・ ・ 60
3) 結果	・ ・ ・ 62
4) 考察	・ ・ ・ 66
5) まとめ	・ ・ ・ 69

VIII. 研究課題 5

マラソンシーズン中のトレーニングやレースによる負荷と生理学的指標,
パフォーマンス指標との関係

1) 目的	・ ・ ・ 70
-------	----------

研究課題 5-1

2) 方法	・ ・ ・ 70
3) 結果	・ ・ ・ 72
4) 考察	・ ・ ・ 74
5) まとめ	・ ・ ・ 76

研究課題 5-2

2) 方法	・ ・ ・ 76
3) 結果	・ ・ ・ 79

4) 考察	・ ・ ・ 85
5) まとめ	・ ・ ・ 88
IX. 総合考察	
1) マラソンレース後の筋損傷, 生理学的指標およびパフォーマンス指標とその個人差	・ ・ ・ 89
2) 現場への示唆	・ ・ ・ 91
3) 本研究の限界および今後の課題	・ ・ ・ 94
X. 結論	・ ・ ・ 97
XI. 引用文献	・ ・ ・ 98
謝辞	・ ・ ・ 118

関連論文

本博士論文は、以下に示した学術雑誌に発表した論文をまとめたものである。

- 高山史徳・平田浩祐・森寿仁・鍋倉賢治・宮本直和 (2016). 大学生市民ランナーのマラソンレースが筋損傷指標と有酸素性能力に与える影響. ランニング学研究, 27: 47-58.
- Takayama, F., Hirata, K., Nabekura, Y., Kanehisa, H., and Miyamoto N. (2017). Effects of marathon running on muscle damage in lower limb muscle groups and maximal aerobic capacity in novice recreational runners. Gazz. Med. Ital., 176: 100-109.
- Takayama, F., Aoyagi, A., Shimazu, W., and Nabekura, Y (2017). Effects of marathon running on aerobic fitness and performance in recreational runners one week after a race. J. Sports Med., 2017: 9402386.
- Takayama, F., Tsuji, T., Aoyagi, A. and Nabekura Y. Recovery of physiological characteristics and muscle soreness after a marathon running in a well-trained runner: a case study. Gazz. Med. Ital., 177: 46-50.
- 高山史徳・鍋倉賢治. 学生市民ランナーにおけるマラソンレース後の筋痛ートレーニング状況およびレースパフォーマンスとの関連性からの検討ー. ランニング学研究, 印刷中.
- 高山史徳・嶋津航・青柳篤・鍋倉賢治. 市民ランナーにおけるマラソンシーズンの生理学的指標, パフォーマンスの回復ならびにトレーニング負荷と主観的体調との関係: 事例研究. 体育学研究, 早期公開中.

I. 緒言

2015 年度に日本国内で開催されたフルマラソン (42.195 km, 以下マラソンとする) レースの公認大会数は 73 であり (ランナーズ編集部, 2016), これは 1992 年度の 30 大会に比べると約 2.5 倍にもなり (ランニング文化研究所, 1993), 東京マラソンが初開催された 2006 年度と比べても約 1.5 倍の増加である. 特に, 一般にマラソンシーズンと呼ばれる 10 月から 3 月の半年間で 64 ものマラソン大会が行われており, これは 1 年間で開催される大会数の約 9 割に相当する.

一口に市民ランナーと言っても, 年齢, 経験, トレーニング状況, 記録によって, 多様な分類が可能である. 例えば, 始めたばかりの初心者から数十年の経験を積んだランナーまで, 年齢では 20 歳代の若者から中高齢者に至るまで幅広いランナーが存在する. また, トレーニング状況においては, 月に数 100 km を走る競技志向の強いランナーから, 月に数 10 km 程度のファンランナーもいる. 記録に関しても, マラソンで 3 時間を切るランナーから, 歩かず完走を目指し, 6 時間程度かけて走るランナーもいる. 本研究では, 特に初心者ランナーを「Novice runner」, トレーニングを積んだランナーを「Trained runner」, 3 時間未満で完走するランナーを「Fast runner」と定義する.

マラソンレースの記録の大部分は, 最大酸素摂取量 (Maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2\max}$), 酸素摂取水準 (Percent utilization of $\dot{V}O_{2\max}$: % $\dot{V}O_{2\max}$) および走の経済性 (Running economy: RE) の 3 つの生理学的指標によって説明できる (Joyner, 1991). また, トレッドミルテストにおける無酸素性閾値 (Anaerobic threshold: AT) の走速度 (velocity at AT: v_{AT}) や最高走速度 (Maximal velocity: V_{\max}) は, 3 つの生理学的指標を反映し (Saunders et al., 2010; Takayama et al., submitted; Tjelta et al., 2012), マラソンレースの記録との間にも強い相関関係が認められるパフォーマンス指標である (Noakes et al., 1990).

マラソンレース後には, 数日間にわたり最大筋力の低下 (Petersen et al., 2007), 血中のクレアチンキナーゼ (Creatine kinase: CK) 活性の上昇 (Kobayashi et al., 2005), 筋

痛の発生 (Tojima et al., 2016), といった筋損傷が起こる. 近年の研究によると, 筋損傷は生理学的指標 (Chen et al., 2007b) やパフォーマンス (Christmas et al., 2017a) を低下させることが明らかとなっている. したがって, マラソンレース後の筋損傷が生じている期間における生理学的指標およびパフォーマンスは低下することが予測される.

マラソンレース後の身体機能の変化あるいは回復に関する多くの先行研究は筋損傷 (Clifford et al., 2017; Hill et al., 2014; Howatson et al., 2010; Tojima et al., 2016), 心機能 (Karlstedt et al., 2012; Knebel et al., 2009; Neilan et al., 2006a, 2006b; Perrault et al., 1986; Whyte et al., 2005) あるいは血液性状 (Kobayashi et al., 2005; Maron et al., 1977) といった観点からの検討であり, マラソンレースの記録と直接的な関係を持つ生理学的指標およびパフォーマンス指標についての報告は少ない. 特に, マラソンレース後の筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を検討した報告は皆無であり, ランナーが一度レースに出場した後, どれぐらいの期間で回復するのかについては不明な点が多い.

大会数の増加に伴い, 近年の市民ランナーの中にはマラソンシーズンの期間において, 毎週あるいは隔週の頻度で複数回にわたりレースに出場する者がいる. 特に 2010 年代の日本男子マラソンを牽引した川内優輝選手は, 複数の国際大会で日本代表に選ばれながら, 毎週のようにレースに出場するという独自のトレーニング方法で注目を集めた. しかし, 高頻度のレース出場は不十分な回復を招き, トレーニングによる適応を妨げたり, オーバーリーチングを誘発する可能性がある. オーバーリーチングとは, トレーニングまたはトレーニング以外のストレスの蓄積によって短期的にパフォーマンスが低下した状態のことをさす (Coutts et al., 2007b). Aubry et al. (2014) は, 23 名の男性トライアスロン選手を対象として, 3 週間の過負荷トレーニング期と 4 週間のテーパリング期の後にそれぞれパフォーマンスを評価している. その結果, 過負荷トレーニング後にオーバーリーチングになった対象者はならなかった対象者と比べてテーパリング期におけるパフォーマンスの

改善度が低かった。この知見は、オーバーリーチングになることがトレーニングによる適応を妨げる可能性があることを示している。

運動誘発性の筋損傷は運動強度 (Paschalis et al., 2005b; Tiidus and Ianuzzo, 1983) やトレーニング状況 (Schwane et al., 1987) によって程度が異なることが知られている。例えば、運動強度の観点からみた場合、低強度運動と比べて高強度運動後における筋損傷が著しい (Tiidus and Ianuzzo, 1983)。これに対し、トレーニング状況の観点からみた場合、事前に同じような運動を行うことで筋損傷は軽減できることが知られている (Schwane et al., 1987)。これらの知見を踏まえると、マラソンレース後においても、レースの完走時間やレース前のトレーニング量といった変数と筋損傷との間に関連が認められる可能性がある。

マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の変化について、市民ランナーの特性による個人差を含めて明らかにすることができれば、レース後に必要な休養期間ならびにトレーニングの方針を提言する上で有益である。そこで本研究では、市民ランナーにおけるマラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を筋損傷との関係から明らかにすることを目的とした。

II. 文献研究

本章では、1) マラソンレースの記録を決定する生理学的指標、2) 筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンスに与える影響、3) マラソンレース後の筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンスの回復、に関する先行研究をそれぞれ要約し、本研究における検討課題を明らかにする。

1) マラソンレースの記録を決定する生理学的指標

マラソンレースの記録の大部分は $\dot{V}O_{2\max}$, $\%\dot{V}O_{2\max}$ および RE によって説明できる (Joyner, 1991). これらの生理学的指標は Classic physiological variables と言われ、この三要因から記録を予測することを Classic model と呼ぶ (McLaughlin et al., 2010).

生理学的指標とマラソンレースの記録との関係を概説する前に、本研究における AT の扱いを定義する. AT は運動強度を増加させたときに無酸素性エネルギーが急激に動員され始める閾値をさす (Wasserman et al. 1973). このうち、血中乳酸濃度 (Blood lactate: BLa) から算出されるものを乳酸性閾値 (Lactate threshold: LT), 酸素摂取量 (Oxygen uptake: $\dot{V}O_2$) や二酸化炭素排出量 (Carbon dioxide production: $\dot{V}CO_2$), 換気量 (Minute ventilation: \dot{V}_E), 呼吸交換比 (Respiratory exchange ratio: RER) といった呼気ガス指標から算出されるものを換気性閾値 (Ventilatory threshold: VT) と呼ぶ (Amann et al., 2006). LT と VT のいずれにおいてもいくつかの定量法があり、そのほとんどで持久性パフォーマンスとの間に強い相関関係が確認されている (Amann et al., 2006). 本論文では、引用した研究のうち BLa をもとに定量したものを LT, 呼気ガス指標から定量したものを VT と表記した. また、LT と VT との間に密接な関係があることが報告されているため (Gaskill et al., 2001), 両指標とも AT の指標として扱った.

$\dot{V}O_{2\max}$ は肺拡散容量、心拍出量、血液量および活動筋の酸素消費による制限を受け、有酸素性エネルギー供給能力を表す代表的な指標である (Bassett and Howley, 2000).

$\dot{V}O_2\text{max}$ とマラソンレースの記録との関係を検討した研究は古くからあり、その多くで有意な相関関係を認めている (Farrell et al., 1979; Foster, 1983; Foster et al., 1977; Hagan et al., 1981, 1987; Loftin et al., 2007; Noakes et al., 1990; Sjödin and Svedenhag, 1985) (Table 1). 例えば, Foster (1983) は 25 名の男性ランナーを対象として, $\dot{V}O_2\text{max}$ とマラソンレースの記録 (3 時間 07 分 \pm 23 分, 平均値 \pm 標準偏差) との間に強い相関関係を認めている ($r = -0.96$).

Table 1 Comparison of correlations between marathon time and maximal oxygen uptake.

Study	n	Marathon time	Correlation coefficient
Farrell et al. (1979)	13	2:17–3:49	0.91*
Foster (1983)	25	3:07 \pm 0:23 (Mean \pm SD)	−0.96
Foster et al. (1977)	23	2:23–4:08	−0.86
Hagan et al. (1981)	50	2:19–4:58	−0.63
Hagan et al. (1987)	35	3:37 \pm 0:32 (Mean \pm SD)	−0.65
Legaz-Arrese et al. (2006)	10	2:12:04 (Mean)	NS
	8	2:34:53 (Mean)	NS
Loftin et al. (2007)	20	4:01 \pm 0:40 (Mean \pm SD)	−0.73
Noakes et al. (1990)	43	2:08–3:26	−0.77
Sjödin and Svedenhag (1985)	35	2:12–3:52	0.78*
Tanaka and Matsuura (1984)	12	2:22:40–3:03:32	NS

NS, not significant; * correlation between average marathon pace and maximal oxygen uptake.

多くの先行研究が $\dot{V}O_2\text{max}$ とマラソンレースの記録との間に有意な相関関係を認めている一方で, Fast runner を対象としたいくつかの研究では有意な相関関係を認めていない (Legaz-Arrese et al., 2006; Sjödin and Svedenhag, 1985; Tanaka and Matsuura, 1984). Sjödin and Svedenhag (1985) は, マラソンレースを 2 時間 30 分未満で完走したランナーを Elite runner (12 名), 2 時間 30 分から 3 時間で完走したランナーを Good runner (16 名), 3 時間以上で完走したランナーを Slow runner (7 名) として, マラソンレースの走速度と $\dot{V}O_2\text{max}$ との関係を検討している. その結果, 全てのランナーを対象とした場合には有意な正の相関関係 ($r = 0.78$) を認めたのに対し, Elite runner のみを対象にした場合, 有意な相関関係がなくなると指摘している ($r = 0.01$). また,

Legaz-Arrese et al. (2006) は、エリートクラスの男性ランナー10名（平均記録：2時間12分04秒）、女性ランナー8名（平均記録：2時間34分53秒）を対象とした場合、いずれの性別においても有意な相関関係がなかったことを報告している。以上を踏まえると、 $\dot{V}O_{2max}$ はマラソンレースの記録と密接な関係があるものの、Fast runner においては高い $\dot{V}O_{2max}$ を有するだけでは優れた記録に繋がらないと考えられる。

% $\dot{V}O_{2max}$ は $\dot{V}O_{2max}$ に対する $\dot{V}O_2$ の水準をさし、筋線維組成、脂質代謝能力および乳酸除去能力の影響を受けると言われている (Pate and Kriska, 1984)。運動時間が短い5000 m 以下の競技において、ランナーは $\dot{V}O_{2max}$ 以上の強度で走行できるが、運動時間が20分を超える競技においては $\dot{V}O_{2max}$ 未満の強度でしか走行できない (Støa et al., 2010)。したがって、運動時間が2時間を超えるマラソンレースでは、 $\dot{V}O_2$ を高く維持する能力 (% $\dot{V}O_{2max}$) が重要になる。% $\dot{V}O_{2max}$ とマラソンレースの記録との関係を検討した研究としては、Davies and Thomson (1979) の報告が挙げられる。彼らは、22名のランナー（マラソンの記録：2時間20分—3時間40分）を対象として% $\dot{V}O_{2max}$ とマラソンレースの記録との間に有意な相関関係を認めている ($r = -0.52$)。加えて彼らは、% $\dot{V}O_{2max}$ と $\dot{V}O_{2max}$ の二要因によってマラソンレースの記録の98%が説明できたことも報告している。また、Hergerud の研究によると、2時間40分程度のランナーの% $\dot{V}O_{2max}$ は約85% $\dot{V}O_{2max}$ であったのに対し、3時間20分程度のランナーでは約78% $\dot{V}O_{2max}$ であった (Helgerud, 1994; Helgerud et al., 1990)。これらの先行研究の結果は、% $\dot{V}O_{2max}$ が高いランナーではマラソンレースの記録が優れていたことを示している。一方、Fast runner を対象とした場合、% $\dot{V}O_{2max}$ とマラソンレースの記録との間に有意な相関関係が認められない場合もある (Scrimgeour et al., 1986; Sjödin and Svedenhag, 1985)。前述した Sjödin and Svedenhag (1985) の研究によると、全てのランナーを対象とした場合、% $\dot{V}O_{2max}$ とマラソンレースの走速度との間に $r = 0.70$ の有意な正の相関関係が認められたが、Elite runner と Good runner のみを対象とした場合で

はその関係は消失している。また、Scirmgeour et al. (1986) は、30 名の男性ランナーをトレーニング量別に 3 群に分類し、マラソンレースの記録（2 時間 56 分±23 分、平均値±標準偏差）と $\dot{V}O_{2\max}$ との関係を検討した結果、マラソンレースの記録はトレーニング量の最も多い群で優れていたのに対し、 $\dot{V}O_{2\max}$ には群間での有意な差を認めていない。以上を踏まえると、幅広いレベルのランナーを対象とした場合、 $\dot{V}O_{2\max}$ と同様に $\dot{V}O_{2\max}$ はマラソンレースの記録と密接な関係があるものの、Fast runner においては高い $\dot{V}O_{2\max}$ を有するだけでは優れた記録に繋がらないと考えられる。

ところで、これまでに挙げた先行研究における $\dot{V}O_{2\max}$ はランナーにトレッドミル上をマラソンレースの走速度で走行させ、そのときの $\dot{V}O_2$ を測定することで算出している。しかし、レース前に実際に走り切れた平均走速度を正確に予測することは難しい。したがって、多くの研究では AT 時の $\dot{V}O_{2\max}$ ($\dot{V}O_{2\max}$ at AT) を Classic model における $\dot{V}O_{2\max}$ の指標として用いている (Joyner, 1991; McLaughlin et al., 2010; Støren et al., 2013; Tjelta et al., 2012)。これは、AT 以下の強度では運動に必要なエネルギーの大部分を有酸素性エネルギー代謝で賄え、AT が長時間持続可能な運動強度の上限であるという生理学的背景に基づいている。実際、Joyner (1991) の研究においても LT 時の $\dot{V}O_{2\max}$ ($\dot{V}O_{2\max}$ at LT) を Classic model に用いている。また、vAT とマラソンレースの走速度はほぼ一致するという結果を踏まえても (Rhodes and McKenzie, 1984; Tanaka and Matsuura, 1984), $\dot{V}O_{2\max}$ at AT を Classic physiological variable として用いることは妥当性があると考えられる。

RE は最大下強度における $\dot{V}O_2$ の大小によって評価できる指標であり、同一速度で走行した場合、 $\dot{V}O_2$ が少ないほど RE は優れていると評価される (Saunders et al., 2004a)。RE に影響を与える要因としては、生理学的因子、バイオメカニクスの因子、形態的因子および神経筋因子が挙げられる (Barnes and Kilding, 2015)。また、RE は相対強度の影響を受け、AT を超える強度では無酸素性エネルギー代謝の動員が急激に増えるため、異

なるレベルのランナーを対象として、同一走速度における $\dot{V}O_2$ から正確に評価することは難しい (Engeroff et al., 2017). したがって、幅広いレベルのランナーを対象とした場合、AT 以下の強度を用いた上で 1 km 走行するのに必要な酸素需要量 (Oxygen cost: O_2 cost) をもとに RE を評価した研究も存在する. 実際、最大下強度における O_2 cost は走速度が異なっても変化しないことから (di Prampero et al., 2009; Fletcher et al., 2009; Helgerud et al., 2010), 異なるレベルのランナーを対象とした場合、RE を評価する上で O_2 cost は妥当性のある指標である.

マラソンレースの記録と RE との関係を検討した研究の見解は一致しておらず、有意な相関関係を認めた報告 (Farrell et al., 1979; Noakes et al., 1990; Sjödin and Svedenhag, 1985) と認めない報告 (Billat et al., 2001; Foster et al., 1977; Legaz-Arrese et al., 2006; Loftin et al., 2009) がそれぞれ複数ある (Table 2). 例えば、Noakes et al. (1990) は、43 名のランナーを対象として、マラソンレースの記録 (2 時間 8 分—3 時間 26 分) と最大下同一走速度における $\dot{V}O_2$ との関係を検討した結果、有意な正の相関関係を認めている ($r = 0.45$). この結果は、 $\dot{V}O_2$ が低いランナー、すなわち RE に優れるランナーほどマラソンレースの記録が優れていたことを示すものであるが、 $\dot{V}O_{2max}$ や $\% \dot{V}O_{2max}$ とマラソンレースの記録との関係に比べ、関係性は弱い. これに対し Foster et al. (1977) は、23 名のランナー (2 時間 23 分—4 時間 8 分) を対象として、両者の間に有意な相関関係を認めていない ($r = 0.36$). 89 名のランナーを競技レベル別に 4 群に分類し O_2 Cost を比較した研究によると、RE は競技レベルが高いランナーほど優れる傾向にあるものの、同一レベルのランナーにおいても RE が優れるランナーと劣るランナーが混在することが報告されている (Morgan et al., 1995). 実際、Fast runner を対象とした Legaz-Arrese et al. (2006) と Billat et al. (2001) の両研究においても、RE とマラソンレースの記録との間には有意な相関関係は認められていない. したがって、RE に優れることはマラソンの記録に貢献するが、それだけで優れた記録を保証するわけではないと考えられる.

および Vmax は気象条件やコースなどの環境による影響を受けないため、生理学的側面に特化してパフォーマンスを推定できる。以上を踏まえ本論文では、生理学的指標を反映したパフォーマンス指標として vAT および Vmax を扱う。

Table 3 Comparison of correlations between marathon time and velocity at anaerobic threshold.

Study	n	Marathon time	Correlation coefficient
Arrese et al. (2006)	10	2:12:04 (Mean)	-0.71
	8	2:34:53 (Mean)	NS
Farrell et al. (1979)	13	2:17-3:49	0.98*
Noakes et al. (1990)	43	2:08-3:26	-0.91
Rhodes and McKenzie (1984)	18	2:13:04-3:21:37	0.94
Roecker et al. (1998)	166	3:06 ± 0:30 (Mean ± SD)	0.93*
Sjödín and Jacobs (1981)	18	2:22:10-4:12:12	0.96*
Sjödín and Svedenhag (1985)	35	2:12-3:52	0.96*
Tanaka and Matsuura (1984)	12	2:22:40-3:03:32	0.78*

NS, not significant; * correlation between average marathon pace and velocity at anaerobic threshold.

2) 筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響

近年の研究により、筋力トレーニングによって引き起こされる筋損傷は、ランニングの生理学的指標に悪影響を及ぼすことが明らかとなっている (Chen et al., 2007b)。また、下り坂走 (Downhill running: DHR) を実施すると、筋損傷が引き起こされると同時にパフォーマンス指標が低下することも報告されている (Christmas et al., 2017a)。そこで本節では、筋損傷がランニングの生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響に関する先行研究を概説する。なお、本研究では、筋損傷を「筋の収縮機能に影響を与えるような筋細胞全体もしくは一部の構造上の破壊」と定義する。バイオプシー法による組織科学的分析は筋の形態学的変化を直接定量できるものの侵襲性が高いため、多くの先行研究では最大筋力、CK、筋痛といった間接的な指標によって評価されている (Sewright et al., 2008)。したがって、本研究においても最大筋力、CK および筋痛を筋損傷の評価指標とする。

筋損傷は1—2日後にピークがみられ、10日後には回復すると考えられている (Clarkson

et al., 1992). また, 筋損傷誘発運動の直後にトレッドミルテストを行った場合, 心拍数 (Heart rate: HR) の増加や 1 回拍出量の減少といった心臓血管系のドリフト現象が生理学的指標に著しい影響を与える (Dressendorfer, 1991). そこで本節では, 筋損傷がランニングの生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響を可能な限り検討するため, 筋損傷誘発運動の 1 日後からおおよそ 1 週間後以内に測定を行った研究を対象とした. Table 4—5 は筋力トレーニング後 (Table 4) および DHR 後 (Table 5) における生理学的指標の変化に関する先行研究をまとめたものである. なお, 本研究では, 引用した論文中に最高酸素摂取量 (Peak oxygen uptake: $\dot{V}O_{2peak}$) と表記されていた場合, そのまま表記したものの, $\dot{V}O_{2max}$ と同等の指標として扱った.

漸増負荷試験によって定量される $\dot{V}O_{2max}$ や AT に比べると, 最大下強度かつ短時間で定量できる RE は, 対象者への負担が少ない. このことから筋損傷が生理学的指標に与える影響を検討した研究の中でも, RE に着目した報告は多い. 著者の知る限り, 筋力トレーニングあるいは DHR による筋損傷が RE に与える影響を報告した研究は合計 17 篇あり (筋力トレーニング: 10 篇, DHR: 7 篇), そのうち 10 篇 (筋力トレーニング: 4 篇, DHR: 6 篇) で RE の低下を認めているが, 残りの 7 篇 (筋力トレーニング: 6 篇, DHR: 1 篇) では RE の有意な低下を認めていない. これらの研究間における結果の不一致は, 筋損傷の程度が関係している可能性がある. Marcora and Bosio (2007) はドロップジャンプを 100 回実施する前と 48 時間後に, 筋損傷指標および $70\%\dot{V}O_{2max}$ における RE を測定している. その報告によると, RE は筋損傷誘発運動前後で有意な差がなく, CK は約 2 倍の増加にとどまっていた (前: 159 ± 107 IU/L, 後: 332 ± 269 IU/L, 平均値 \pm 標準偏差). 一方, RE の有意な低下を認めた多くの研究は, 筋損傷誘発運動後における筋損傷指標の著しい変化を捉えている. Chen et al. の研究グループは, 傾斜-15%条件での $70\%\dot{V}O_{2max}$ における 30 分 DHR を筋損傷誘発運動として行わせた 4 つの研究で, いず

Table 4 Comparison of effects of resistance training on physiological variables.

Study	Subjects	EIMD	Muscle damage markers	Results	
				Times	Physiological variables
Black et al. (2015)	8 active subjects	4 × maximal repetitions of single-leg split squat at 40% body weight	↑MS ↓strength	2, 4, 7 and 10 d after	↓ $\dot{V}O_{2peak}$ ↓ $\dot{V}O_2$ at VT (until 7 d after)
Burt et al. (2012)	10 active subjects	10 × 10 times of squats at 80% body weight	↑MS ↓strength ↑CK	24 and 48 h after	↓RE ↔Bla
Burt et al. (2013)	9 active subjects	10 × 10 times of squats at 80% body weight	↑MS ↓strength ↑CK	24 and 48 h after	↓RE ↑Bla
Burt et al. (2014)	8 active subjects	10 × 10 times of squats at 80% body weight	↑MS ↓strength ↑CK	24 and 48 h after	↓RE ↑Bla
Burt et al. (2015)	16 active subjects	10 or 5 × 10 times of squats at 80% body weight	↑MS ↓strength ↑CK	24 and 48 h after	↓RE ↑Bla
Christmas et al. (2017b)	10 active subjects	5 × 15 times of maximal eccentric actions of knee extensors and flexors	↑MS ↓strength	48 h after	↔ $\dot{V}O_{2max}$
Doma et al. (2015)	14 recreational runners	3 × 6 times of squats, single-leg press, leg extension and leg curls at 95% of 6RM	↑MS ↓strength ↑CK	24 and 48 h after	↔RE
Marcora and Bosio (2007)	15 recreational runners	10 × 10 times of drop jumps from a 35 cm bench	↑MS ↓strength ↑CK	48 h after	↔RE ↔Bla
Paschalis et al. (2005a)	10 active subjects	12 × 10 times of maximal eccentric actions of knee extensors	↑MS ↓strength ↑CK	24, 48, 72 and 96 h after	↔RE
Satkunskienė et al. (2015)	9 active subjects	3 min × 8 times of bench-stepping exercise from a 40 cm bench	↑MS ↑CK	24 h after	↔RE ↔% $\dot{V}O_{2max}$ at VT ↔ $\dot{V}O_{2max}$
Scott et al. (2003)	11 active subjects	3-4 × 10 times of squat, lunges, step up and step down, and stiff-legged dead lift	↑MS	24-30 h after	↔RE ↔Bla
Vassilis et al. (2008)	12 active subjects	12 × 10 times of maximal eccentric actions of knee extensors	↑MS ↓strength ↑CK	48 h after	↔RE

EIMD, exercised-induced muscle damage; RM, repetition maximal; MS, muscle soreness; CK, creatine kinase; RE, running economy; $\dot{V}O_{2peak}$, peak oxygen uptake; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen uptake; Bla, blood lactate; VT, ventilatory threshold, ↔, not significant; ↑, significant increase; ↓, significant decrease.

Table 5 Comparison of effects of downhill running on physiological variables.

Study	Subjects	EIMD	Muscle damage markers	Results	
				Times	Physiological variables
Baumann et al. (2014)	11 active subjects	6 × 5 min DHR (-12%) at 12.9km/h	↑MS ↓strength, ↑CK	2 d after	↓RE (65% $\dot{V}O_{2peak}$) ↔RE (75% $\dot{V}O_{2peak}$) ↔Bla
Braun and Dutto (2003)	9 well-trained subjects (3 triathletes and 6 runners)	30 min DHR (-10%) at 70% $\dot{V}O_{2peak}$	↑DOMS	48 h after	↓RE ↑Bla
Chen et al. (2007a)	12 active subjects	30 min DHR (-15%) at 70% $\dot{V}O_{2max}$	↑MS ↓strength ↑myoglobin	24, 48, 72, 96 and 120 h after	↓RE (until 72 h) ↑Bla (until 72 h)
Chen et al. (2007b)	10 active subjects	30 min DHR (-15%) at 70% $\dot{V}O_{2peak}$	↑MS ↓strength ↑CK ↑myoglobin	1, 2, 3, 4 and 5 d after	↓RE (until 3 d) ↑Bla (until 3 d)
Chen et al. (2008)	50 active subjects	30 min DHR (-15%) at 70% $\dot{V}O_{2max}$	↑MS ↓strength ↑CK ↑LDH	2, 5 and 7 d after	↓RE ↑Bla (until 5 d)
Chen et al. (2009)	15 untrained subjects	30 min DHR (-16%) at 70% $\dot{V}O_{2max}$	↑MS ↓strength ↑CK ↑myoglobin	2 and 5 d after	↓RE (80% and 90% $\dot{V}O_{2max}$) ↔RE (70% $\dot{V}O_{2max}$) ↑Bla (80% and 90% $\dot{V}O_{2max}$) ↔Bla (70% $\dot{V}O_{2max}$)
Christmas et al. (2017a)	40 active subjects	30 min DHR (-12.5%) at 70% V_{max}	↑MS ↓strength ↑CK	48 h after	↔ $\dot{V}O_{2max}$
Hamill et al. (1991)	10 recreational runners	30 min DHR (-15%) at 73.5% HR_{max}	↑MS ↑CK	2 and 5 d after	↔RE

EIMD, exercised-induced muscle damage; DHR, downhill running; $\dot{V}O_{2peak}$, peak oxygen uptake; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen uptake; V_{max} , maximal velocity; HR_{max} , maximal heart rate; MS, muscle soreness; CK, creatine kinase; RE, running economy; Bla, blood lactate; ↔, not significant; ↑, significant increase; ↓, significant decrease.

れも RE の有意な低下を認めている (Chen et al., 2007a, 2007b, 2008, 2009). 例えば Chen et al. (2007b) の報告では, CK が 2 日後に約 4 倍 (前 : 105 ± 29 IU/L, 後 : 462 ± 71 IU/L, 平均値 \pm 標準誤差) の増加, 最大筋力が 4 日後まで有意な低下を示し, RE は 3 日後まで有意に低下していた. また, Burt et al. の研究グループは, 体重の 80% の重量を用いた 10 回 \times 10 セットのスクワットを行うことで, 翌日以降の RE が低下するという報告を 4 つの研究で発表しており, いずれも筋痛の発生, CK の増加および最大筋力の低下を認めている (Burt et al., 2012, 2013, 2014, 2015). 以上を踏まえると, 筋損傷の程度が著しい場合に RE は低下する可能性が高い.

筋損傷による RE の低下に関しては, 動員される筋線維数が増加すること, 伸張—短縮サイクル運動の遂行能力の低下, 痛みによるランニングフォームの変化などが原因として考えられている (Chen et al., 2007b). Burt et al. (2015) は, スクワットの前, 24 時間後および 48 時間後に vLT の速度でランニングを行わせた結果, スクワット後では RE の低下とともにストライド長の短縮ならびに筋電図の最大振幅値の増加を認めている. また, Braun and Dutto (2003) は, DHR の前と 48 時間後における最大下同一走速度の $\dot{V}O_2$ の変化とストライド長の変化との間には有意な相関関係があることを報告している ($r = -0.79$). この結果について彼らは, 筋損傷による痛みがストライド長を短縮させ, それが RE を低下させたと考察している.

著者の知る限り, 筋力トレーニングあるいは DHR による筋損傷が $\dot{V}O_{2max}$ もしくは $\dot{V}O_{2peak}$ に与える影響を検討した研究は 4 篇あり (Black et al., 2015; Christmas et al., 2017a, 2017b; Satkunskenė et al., 2015), うち 1 篇で有意な低下を認めている. Black et al. (2015) の研究では, 片脚スクワットの 2 日後における $\dot{V}O_{2peak}$ は 7.4% 有意に低下し (前 : 55.5 ± 6.0 ml/kg/min, 後 : 51.3 ± 5.8 ml/kg/min, 平均値 \pm 標準偏差), 10 日後においても 8 名の対象者中 6 名が低下していた. 一方, Christmas et al. (2017a) は 70% V_{max} で 30 分の DHR (傾斜 : -12.5%) を筋損傷誘発運動として行わせた結果, 48

時間後の $\dot{V}O_{2\max}$ は DHR 前と同等であったことを報告している。また, Satkunschienė et al. (2015) は, 3 分×8 セットのベンチステッピング運動 (踏み台昇降運動) の前と 24 時間後に $\dot{V}O_{2\max}$ を測定した結果, 両者に有意な差を認めていない。

ランニングのような全身運動において, $\dot{V}O_{2\max}$ は心拍出量による制限を受けやすいと言われている (Bassett and Howley, 2000)。Höchli et al. (1995) は, 8000 km の距離を 30 日間にわたり走者が交替しながら走る砂漠ウルトラマラソン (1 回の走行距離: 20 km, 走る頻度: 16.5 時間/回) に出場した 6 名のランナーを対象として, レースの前後に $\dot{V}O_{2\max}$ および筋の酸化能力 (バイオプシー法によって定量) を測定した結果, 筋の酸化能力は著しく低下した一方で, 絶対値の $\dot{V}O_{2\max}$ には有意な変化がなかったことを報告した (ただし, レース後に体重が増加したために相対値の $\dot{V}O_{2\max}$ は低下した)。彼らは, この結果に基づき, 筋の酸化能力は $\dot{V}O_{2\max}$ の制限因子にならないと主張している。また, Caldwell et al. (2016) は, 膝関節伸展の伸張性運動の前と 48 時間後に自転車エルゴメーターによる漸増負荷試験を行い, 筋損傷指標, 安静時の浅大腿動脈の血管内皮機能, 運動中の $\dot{V}O_2$ 動態ならびに外側広筋の酸素動態の変化を検討した。その結果, 伸張性運動の前に比べて 48 時間後では筋損傷ならびに血管内皮機能の低下を認めた。しかし, 漸増負荷試験における $\dot{V}O_2$ 動態, $\dot{V}O_{2\max}$ および外側広筋の酸素動態には有意な差を認めなかった。このような結果に基づき彼らは, 筋損傷誘発運動後では, 活動筋の酸素消費に関係する血管機能が低下したとしても, それが運動時の $\dot{V}O_2$ 動態に与える影響は最小限に留まると結論づけている。Höchli et al. (1995) および Caldwell et al. (2016) の結果を踏まえると, 筋損傷によって安静時における筋の酸化能力が低下しても, ランニングの $\dot{V}O_{2\max}$ に与える影響はほとんどないと考えられる。同一対象者を対象としても, ランニング時の $\dot{V}O_{2\max}$ は日々変動しており, 複数回測定した場合の変動係数は 4–9% になることが報告されている (Lourenço et al., 2011; 山地ほか, 2000)。筋損傷が $\dot{V}O_{2\max}$ に与える影響を検討した先行研究の低下率は, いずれもこの範囲内におさまる。したがって, 筋損傷は $\dot{V}O_{2\max}$ を

低下させうるが、その影響は比較的軽微であると考えられる。

筋損傷がランニングの $\dot{V}O_{2\max}$ at AT に与える影響を検討した研究は、Satkunskienė et al. (2015) の報告に限られ、その研究では有意な変化は認められていない。また、Black et al. (2015) は、体重の 40%の重量を用いた片脚スクワットを最大反復回数で休息を挟みながら各脚 4 セット実施させ、VT 時の $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ at VT) の変化を 10 日後まで 4 回にわたり測定した。その結果、 $\dot{V}O_2$ at VT は、片脚スクワット前に比べて 7 日後まで有意に低下していた（低下率、2 日後：10.7%、4 日後：10.0%、7 日後：6.2%）。しかし、この研究では $\dot{V}O_{2\max}$ にも有意な低下が認められていることから（低下率、2 日後：7.4%、4 日後：5.5%、7 日後：4.9%）、 $\dot{V}O_{2\max}$ at VT の変化は $\dot{V}O_2$ at VT に比べ軽微であったと考えられる。

自転車エルゴメーターを用いた実験ではあるものの、Davies et al. (2011) は筋損傷が VT と LT に与える影響に関する興味深い研究を行っている。彼らは、体重の 70%の重量を用いた 10 回×10 セットのスクワットの前後と 48 時間後に漸増負荷試験を行い、運動中の呼気ガス指標を継続的に、 $\dot{V}E$ を 1 分毎に測定することで VT と LT を定量した。その結果、LT 時の $\dot{V}O_2$ ($\dot{V}O_2$ at LT) は筋損傷誘発運動前後で有意な差がなかったのに対し（前：1.90 ± 0.20 L/min、後：1.88 ± 0.15 L/min、平均値±標準偏差）、 $\dot{V}O_2$ at VT は有意な低下を示した（前：1.58 ± 0.26 L/min、後：1.41 ± 0.14 L/min）。また、この研究では筋損傷誘発運動前後で $\dot{V}O_{2peak}$ には有意な変化がなかったことから、 $\dot{V}O_{2peak}$ は VT のみ低下していたと考えられる。VT が低下した原因について彼らは、筋損傷によりグループⅢ・Ⅳタイプの求心性線維が呼吸循環中枢を刺激し、 $\dot{V}E$ を増加させたことによると推察している。以上を踏まえると、筋損傷では $\dot{V}O_{2\max}$ at LT よりも $\dot{V}O_{2\max}$ at VT の方が低下する可能性が高いと考えられる。

前節で述べたとおり、 vAT および V_{\max} はマラソンレースの記録を推定する上で最も優れたパフォーマンス指標である (Noakes et al., 1990)。筋損傷とパフォーマンス指標との

関係を検討した先行研究は筋損傷でのパフォーマンス指標の低下を認めている (Black et al., 2015; Christmas et al., 2017a, 2017b). 特に Christmas et al. (2017a, 2017b) の一連の研究では, $\dot{V}O_{2max}$ に有意な変化を認めていないのにも関わらず, V_{max} には有意な低下を認めており, 生理学的指標よりもパフォーマンス指標は筋損傷の影響を受けやすいことを示している. Marcora and Bosio (2007) はドロップジャンプを 100 回実施する前と 48 時間後に, $70\%\dot{V}O_{2max}$ における生理学的応答ならびに 30 分タイムトライアルを測定した結果, RE および BLa は両条件で有意な差がなかったのに対し, 30 分タイムトライアルの総走行距離はドロップジャンプの 48 時間後で有意に低下したことを報告した. この原因について彼らは, 下肢筋力の低下と脚の痛みにより主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE) が高まったことが影響したと考察している. 実際, この研究では $70\%\dot{V}O_{2max}$ における RPE は増加傾向を示し (前: 12.5 ± 0.9 , 後: 13.2 ± 1.2 , $p = 0.08$), RPE と総走行距離の変化との間には有意な負の相関関係があった ($r = -0.56$). つまり, 最大下同一走速度において, ドロップジャンプ前に比べてきつと感じたランナーほどパフォーマンスは低下していた. ランナーは潜在的な恒常性維持システムを基に RPE を調整するため (St Clair Gibson et al., 2003), オールアウトに至る場合であっても, 生体の恒常性が破綻し, 完全に疲労しきった状態で運動を終えることはないと言われている (Noakes, 2007). 特に筋損傷では, さらなる傷害を防ぐために中枢神経系から活動筋への出力が低下し, パフォーマンスに影響を与えることが示唆されている (Burt and Twist, 2011). 実際, Christmas et al. (2017a) の研究においても, 筋損傷誘発運動の 48 時間後では対象者がトレッドミルテストでより痛みを感じており, それが TTE の低下に関係していたことが指摘されている. また, 前述のとおり筋損傷によって \dot{V}_E は増加する場合がある. \dot{V}_E の増加は RPE を高め, 高強度運動におけるパフォーマンスの低下を引き起こすことが報告されている (Davies et al., 2009). 以上を踏まえると, 筋損傷が生じるとパフォーマンス指標は生理学的指標よりも低下しやすいと考えられる. その原因としては, 筋

損傷による中枢神経系の影響が関係している。つまり、筋損傷が起こると、生理学的指標に変化がなくてもランナーはきつさを感じ、それがパフォーマンス指標の低下につながる可能性がある。

3) マラソンレース後の筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復

前節までの文献研究により、1) マラソンレースの記録は生理学的指標 ($\dot{V}O_{2max}$, $\% \dot{V}O_{2max}$ at AT, RE) と密接な関係を持ち、パフォーマンス指標である vAT あるいは $Vmax$ から大部分が推定できること、2) 筋損傷が生じるとパフォーマンス指標は低下し、その原因の一つとして生理学的指標の低下が関係していることが明らかとなった。マラソンレースでは長時間にわたり繰り返される着地衝撃によって筋損傷が起こることから (Sanchez et al. 2006)、マラソンレース後には生理学的指標やパフォーマンス指標の低下が起こる可能性がある。そこで本節では、マラソンレース後の筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を検討した先行研究を概説する。

Bishop et al. (2008) はトレーニング後の回復に関する総説において、回復を「ある特定の活動において事前のパフォーマンスを達成もしくは上回ることでできる能力」と定義している。マラソンレース後の回復を検討した先行研究においても、レース前後の各指標を主に統計学的手法によって比較することによって回復状況を検討している。そこで本研究では回復を「評価指標がマラソンレース前と比べて差がない状態になること」と定義する。

Warren et al. (1999) は、筋損傷の評価指標に関する総説において、正確性や信頼性の観点から最大随意等尺性収縮 (Maximal voluntary isometric contraction: MVIC) トルクが最も優れた指標の一つであると述べている。マラソンレース後の MVIC トルクの回復に関しては、膝関節伸展筋群を対象部位とした研究が多い (Clifford et al., 2017; Hill et al., 2014; Howatson et al., 2010; Petersen et al., 2007) (Table 6)。Petersen et al. (2007) は、マラソンレースに出場した Fast runner (2 時間 34 分 40 秒 \pm 4 分 13 秒, 平均値 \pm 標準誤

差)を対象として膝関節伸展の MVIC トルクをレースの前, 直後, 2 日後および 5 日後に測定している。その結果, レース直後には 22.6%の有意な低下を認めたが, 2 日後と 5 日後の測定値はレース前と変わらなかった。これに対し, マラソンレースを 3 時間 45 分程度で完走したランナーを対象とした研究では, 膝関節伸展の MVIC トルクは 2 日後まで有意な低下を認めている (Hill et al., 2014)。一方, Petersen et al. (2007) の研究では, 足関節底屈の MVIC トルクにはレース 2 日後に 25.4%の有意な低下が認められている。Fast runner における足関節底屈の MVIC トルクの低下が著しい原因について Petersen et al. (2007) は, 長いストライドを伴う長時間高強度運動が立脚期後半の足関節底屈筋群の歪みに寄与し, そのことが筋に著しい損傷を与えたと推察している。しかし, Petersen et al. (2007) の研究を除くとマラソンレース後の足関節底屈の MVIC トルクの回復を検討した報告はみあたらず, 異なるレベルのランナーにおける足関節底屈筋群の筋損傷については不明である。また, ランニングでは膝関節伸展筋群や足関節底屈筋群に加え膝関節屈曲筋群も主働筋として活動する (Novacheck, 1998)。しかし, マラソンレース後の筋損傷の筋間差を詳細に検討した研究は少なく, 膝関節屈曲筋群については検討例がない。

CK は, 筋損傷の程度を反映する指標として限界があると指摘されているものの, 筋損傷の有無を判断する指標として多くの研究で用いられている (Bishop et al., 2008)。著者らの知る限り, マラソンレース後における CK の回復を検討した研究のうち, 1 週間以降に有意な増加を認めた報告はない (Asp et al., 1997; 1999; Hill et al., 2014; Kobayashi et al., 2005; Kyröläinen et al. 2000; Liang et al., 2001; Tojima et al., 2016) (Table 7)。また, 筋痛に関しても, 全ての研究がレース後 1 週間以内に回復することを認めている (Kyröläinen et al., 2000; Liang et al., 2001; Sherman et al., 1984; Tojima et al., 2016) (Table 8)。つまり, 先行研究は CK および筋痛はレース後 1 週間以内に回復することを示している。

筋損傷は運動強度 (Paschalis et al., 2005b; Tiidus and Ianuzzo, 1983) やトレーニング

Table 6 Recovery time course for maximal voluntary isometric contraction after marathon running.

Study	Subjects	Marker	Time (days after competition)			
			1	2	3	5
Clifford et al. (2017)	17 recreational runners ^{*1}	KE	↓	↔		
	17 recreational runners ^{*2}	KE	↓	↔		
Hill et al. (2014)	12 recreational runners ^{*3}	KE	↓	↓	↔	
	12 recreational runners ^{*4}	KE	↓	↓	↔	
Howatson et al. (2010)	10 recreational runners ^{*5}	KE	↓	↔		
	10 recreational runners ^{*6}	KE	↓	↓		
Petersen et al. (2007)	8 elite runners	KE		↔		↔
		PF		↓		↔
Ross et al. (2008)	9 recreational runners	DF	↔			

Blanks indicate no data reported. KE, knee extension; KF, knee flexion; PF, plantar flexion; DF, dorsal flexion;

↔, not significant; ↓, significant decrease.

^{*1} These runners consumed beetroot juice for 3 days after marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 3 days after marathon running.

^{*3} These runners wore lower limb compression tights for 72 hours after marathon running.

^{*4} These runners received a single treatment of 15 minutes of sham ultrasound after marathon running.

^{*5} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

^{*6} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

Table 7 Recovery time course for creatine kinase after marathon running.

Study	Subjects	Time (days after race)						
		1	2	3	4	5	6	7
Asp et al. (1997)	7 recreational runners	↑	↑					↔
Asp et al. (1999)	6 recreational runners	↑	↑					↔
Clifford et al. (2017)	17 recreational runners ^{*1}	↑	↑					
	17 recreational runners ^{*2}	↑	↑					
Hill et al. (2014)	12 recreational runners ^{*3}	↑	↑	↔				
	12 recreational runners ^{*4}	↑	↑	↔				
Howatson et al. (2010)	10 recreational runners ^{*5}	↑	↑					
	10 recreational runners ^{*6}	↑	↑					
Kim et al. (2009)	10 trained runners	↑	↑	↑	↑	↔	↔	
Kobayashi et al. (2005)	15 recreational runners	↑	↑	↑				↔
Kyröläinen et al. (2000)	7 trained triathletes		↑		↑		↔	
Liang et al. (2001)	15 recreational runners	↑	↑		↔			
Martin et al. (2015)	17 recreational runners	↑	↑					
Soeder et al. (1989)	11 runners	↑	↑	↑				
Tojima et al. (2016)	11 recreational runners	↑	↑			↔		

Blanks indicate no data reported. ↔, not significant; ↑, significant increase.

^{*1} These runners consumed beetroot juice for 3 days after marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 3 days after marathon running.

^{*3} These runners wore lower limb compression tights for 72 hours after marathon running.

^{*4} These runners received a single treatment of 15 minutes of sham ultrasound after marathon running.

^{*5} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

^{*6} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

Table 8 Recovery time course for perceived muscle soreness after marathon running.

Study	Subjects	Time (days after race)						
		1	2	3	4	5	6	7
Howatson et al. (2010)	10 recreational runners ^{*1}	↑	↑					
	10 recreational runners ^{*2}	↑	↑					
Kyröläinen et al. (2000)	7 trained triathletes	↑	↑	↑	↑	↑	↔	
Liang et al. (2001)	15 recreational runners	↑	↑		↔			
Sherman et al. (1984)	10 elite runners	↑		↑		↔		↔
Tojima et al. (2016)	11 recreational runners	↑	↑	↔	↔	↔		

Blanks indicate no data reported. ↔, not significant; ↑, significant increase.

^{*1} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and for 2 days after marathon running.

グ状況 (Schwane et al., 1987) の影響を受けることが知られている。また, Petersen et al. (2007) と Hill et al. (2014) の両研究における膝関節伸展の MVIC トルクの回復の差を踏まえても, マラソンレース後の筋損傷はレースパフォーマンスによる影響を受ける可能性が考えられる。しかし, マラソンレース後の筋損傷を検討した多くの研究は, コンプレッションウェアやサプリメントなどの介入効果を検討したものであり (Clifford et al., 2017; Hill et al., 2014; Howatson et al., 2010; Liang et al., 2001; Nakagawa et al., 2018), レースパフォーマンスおよびトレーニング状況との関連を詳細に検討した研究はみあたらない。

Table 9 はマラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を検討した先行研究をまとめたものである。著者の知る限り, マラソンレース直後における $\dot{V}O_2\text{max}$ の変化を報告した研究はないが, ハーフマラソンレース直後に測定した研究は一つ存在する (Dressendorfer, 1991)。その報告によると, ハーフマラソンレース後 30 分以内に測定された $\dot{V}O_2\text{max}$ は, コントロール (直前にランニングをしない) 条件と比べて 6.2% の有意な低下であった。 $\dot{V}O_2\text{max}$ の低下の原因について Dressendorfer (1991) は, 最大下同一強度における HR がハーフマラソンレース直後で有意に高かったことから, 1 回拍出量の減少によるものだと考察している。ランニングにおける HR の増加および 1 回拍出量の減少といった心臓血管系のドリフトは, 30 km 以降で顕著なことから (Billat et al., 2012), マラソン直後の $\dot{V}O_2\text{max}$ はハーフマラソン以上に低下すると推測できる。Sierra et al. (2016) は, 6 名のランナー (マラソンレースの記録: 3 時間 41 分, 中央値) を対象としてマラソンレースの前と 3-4 日後に $\dot{V}O_2\text{peak}$ を測定した結果, レース前に比べて 3-4 日後では有意な低下 (低下率: 8.7%) を報告している。一方, Noble et al. (1979) は, 6 名のランナー (マラソンレースの記録: 2 時間 41 分-3 時間 19 分) を対象としてマラソンレースの前と約 2 週間後にトレッドミルテストを行った結果, 両者に有意な差を認めていない (前: 68.0 ml/kg/min, 後: 67.5 ml/kg/min, 平均値)。ただし, これらの研究で

はレース後の測定を 1 回しか行っていないため、詳細な回復過程は不明である。

マラソンレース後の RE の回復を検討した研究は, Kyröläinen et al. (2000) と Petersen et al. (2007) の報告に限られる。Kyröläinen et al. (2000) は, 7 名のトライアスロン選手を対象として, 実験的に行われたマラソンレースの前後に経時的に $\dot{V}O_2$ を測定した結果, レースの前と 2 日後, 4 日後および 6 日後との間に有意な差がなかったことを報告した。一方, Petersen et al. (2007) の研究では, マラソンレースの 2 日後と 5 日後に測定されたエネルギー消費量 ($\dot{V}O_2$ と RER をもとに定量) はレース前に比べ有意に低かったことから RE は向上していた。ただし, この研究では半数のランナーが著しい疲労感のためレース後の測定を行っていないため, 対象者数が少ない ($n = 4$)。前述のとおり RE は筋損傷が著しいランナーほど低下する可能性があることを踏まえると, Petersen et al. (2007) の結果は, RE の変化を過小評価している可能性がある。

マラソンレース後のパフォーマンス指標の回復を検討した研究には限りがあり, その見解も一致していない (Armstrong et al., 2015; Hottenrott et al., 2016; Jacobs et al., 1981; Sierra et al., 2016)。また, これまで述べてきたとおり, マラソンレース後の $\dot{V}O_{2max}$ と RE の回復を検討した研究は, 量的にも質的にも限界があり, $\% \dot{V}O_{2max}$ at AT については報告が皆無である。さらに, マラソンレース後の生理学的指標とパフォーマンス指標の変化を筋損傷との関係から検討した研究はみあたらない。筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に影響を与えるという先行研究の結果を踏まえると, マラソンレース後の筋損傷が生じている期間では生理学的指標およびパフォーマンス指標の低下が予測される。

Table 9 Recovery time course for physiological and performance variables after marathon running.

Study	Subjects	Marker	Time (days after race)						
			1	2	3	4	5	6	14
Armstrong et al. (2015)	17 recreational runners ^{*1}	TTE							↑
	16 recreational runners ^{*2}	TTE							↓
Hottenrott et al. (2016)	42 recreational runners	V _{IAS}				↑			
		V _{IANS}				↔			
		V _{max}				↓			
Jacobs et al. (1981)	7 recreational runners	vOBLA							↑
Kyröläinen et al. (2000)	7 trained triathletes	RE		↔		↔		↔	
Noble et al. (1979)	7 elite runners	$\dot{V}O_{2max}$							↔
Petersen et al. (2007)	4 elite runners	RE		↑			↑		
Sierra et al. (2016)	6 recreational runners	$\dot{V}O_{2peak}$			↓				
		V _{max}			↔				
Zouhal et al. (2006)	9 elite runners	$\dot{V}O_{2max}$			↔				
		V _{max}			↔				

Blanks indicate no data reported. TTE, time to exhaustion; V_{IAS}, velocity at individual aerobic threshold; V_{IANS}, velocity at individual anaerobic threshold; V_{max}, maximal velocity;

vOBLA, velocity at onset of blood lactate accumulation; RE, running economy; $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen uptake; $\dot{V}O_{2peak}$, peak oxygen consumption;

↔, not significant; ↑, significant increase; ↓, significant decrease.

^{*1} These runners wore compression socks for 48 h immediately after marathon running.

^{*2} These runners wore placebo socks for 48 h immediately after marathon running.

Ⅲ. 研究課題の設定

1) 問題点

文献研究によって、1) マラソンレースの記録は生理学的指標と密接な関係を持ち、 vAT あるいは V_{max} によって大部分が推定できること、2) 筋損傷が起こるとパフォーマンス指標は一時的に低下し、その原因の一つとして生理学的指標の低下が関係していることが明らかとなった。一方、マラソンレース後に筋損傷が起こることは明らかになっているものの、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復については不明な点が多く、筋損傷との関係から検討した研究もみあたらない。また、大会数の増加に伴い、レースを高頻度で走る市民ランナーが増加している現状があるにも関わらず、先行研究の中に繰り返しマラソンレースを走ることを想定したものはほとんどない。したがって、マラソンレース後に必要な休養期間ならびにレース後のトレーニングの方針を提言する上で以下のことを明らかにする必要がある。

1. 筋力トレーニングあるいは DHR 後に筋損傷が起こり、生理学的指標とパフォーマンス指標が低下することが報告されている。しかし、マラソンレース後の筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を検討した先行研究はなく、筋力トレーニングあるいは DHR 後の筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を検討した先行研究と同様の結果が認められるかは不明である。

2. マラソンレース後における筋損傷の評価指標として MVIC トルクを用いた多くの先行研究では、膝関節伸展筋群を対象部位としている。ランニングでは、膝関節伸展筋群の他に、膝関節屈曲筋群や足関節底屈筋群も主働筋として活動する。しかし、マラソンレース後の膝関節屈曲筋群および足関節底屈筋群の筋損傷を検討した研究は少なく、筋損傷の筋間差については不明な点が多い。

3. マラソンレースのほとんどは週末に開催されており、毎週の頻度でレースに出場するランナーもいる。しかし、マラソンレース 1 週間後に生理学的指標およびパフォーマンス指標が完全に回復するのかは明らかになっていない。したがって、マラソンレース 1 週間後のこれらの回復を検討することは価値が高い。

4. 筋損傷は運動強度やトレーニング状況の影響を受けることが知られている。したがって、マラソンレース後の筋損傷についても、レースの完走時間やレース前の走行距離といった変数と関連が認められる可能性がある。レースパフォーマンスとトレーニング状況が筋損傷と関連していれば、マラソンレース後の筋損傷の個人差を明らかにできる。また、筋損傷の程度によって生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響が異なることを踏まえると、マラソンレース後の筋損傷の個人差を明らかにできれば、レース後の回復を促進することを目的としたトレーニング戦略を講じる際の参考資料となる。

5. マラソンレース後の回復を検討したほとんどの先行研究は、ある 1 回のレース後の回復を検討したのみである。したがって、短期間に高頻度でレースに出場したランナーの生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復については明らかになっていない。短期間に高頻度でレースに出場するランナーを対象として、マラソンシーズン中のトレーニングやレースによる負荷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を検討することは、ランニングの実践現場に示唆を与える資料となる。

2) 研究課題の設定

以上の問題点を踏まえ、本研究では、マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を明らかにするために、筋損傷との関係に着目し、以下の研究課題を設定

定した。なお、本研究における全ての研究課題は、所属機関の研究倫理委員会の承認を得た上で実施した。

研究課題 1

マラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響を明らかにすることを目的とした。

研究課題 2

マラソンレース後の筋損傷の回復における筋間差を明らかにすることを目的とした。また、筋損傷から回復した直後の生理学的指標およびパフォーマンス指標を検討した。

研究課題 3

マラソンレース 1 週間後における生理学的指標およびパフォーマンス指標を明らかにすることを目的とした。

研究課題 4

様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有するランナーを対象として、マラソンレース後の筋痛を明らかにすることを目的とした。

研究課題 5

マラソンシーズン中のトレーニングやレースによる負荷と生理学的指標、パフォーマンス指標との関係を事例的に検討した。

IV. 研究課題 1

マラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響

1) 目的

マラソンレースの記録は生理学的指標と密接な関係を持ち (Joyner, 1991), v_{AT} あるいは V_{max} によって大部分が推定できる (Noakes et al., 1990). 筋損傷は生理学的指標およびパフォーマンス指標を低下させる (Black et al., 2015). したがって, マラソンレース後の筋損傷が生じている期間における生理学的指標およびパフォーマンス指標は低下することが予測される. しかし, マラソンレース後のそれらの変化を筋損傷との関係から検討した先行研究はない.

そこで研究課題 1 では, **Novice runner** を対象として, マラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響を明らかにすることを目的とした.

2) 方法

A. 対象者と対象レース

対象者は, 少なくとも 1 日 30 分程度のランニングを週に 2 回以上, 習慣的に実施している大学生 7 名 (男性: 5 名, 女性: 2 名, 年齢: 23 ± 1 歳, 身長: 170 ± 6 cm, 体重: 62.9 ± 7.4 kg, マラソン完走経験: 0.6 ± 0.8 回, 月間走行距離: 138 ± 97 km) であった. 研究課題 1 の対象者の中には陸上競技部や地域のランニングクラブに所属している者はいなかった.

対象者は, 2014 年 10 月に開催された日本陸上競技連盟公認のマラソンレースである筑後川マラソン 2014 に出場し, 4 時間 21 分 01 秒 \pm 41 分 43 秒 (3 時間 05 分 52 秒—5 時間 04 分 42 秒) で完走した. スタート時における大会地域の気温は 23.9 °C, 天候は曇り, 風速は 4.4 m/s であった.

B. 実験デザイン

本研究課題の測定は、レースの 5 日前（レース前）、2 日後および 10 日後に行われた。レース後の測定を 2 日後と 10 日後に設定したのは、筋損傷は運動 1–2 日後にピークがみられ、10 日後には回復するという先行研究（Clarkson et al. 1992）に基づいたためである。各測定日では先に筋損傷の測定を行った。その後、トレッドミルテストによって生理学的指標およびパフォーマンス指標を測定した。測定の実施時間は、すべての測定日において対象者内で同一の時間帯とし、トレッドミルテストの測定開始 3 時間前から水以外の飲食物の摂取を禁じた。

C. 実験内容

C-1. 筋損傷

本研究課題では、筋損傷の指標として膝関節伸展および足関節底屈の MVIC トルク、CK を測定した。

筋力測定装置（CON-TREXMJ, PHYSIOMED 社製）を用い、右脚の膝関節伸展および足関節底屈を対象に MVIC トルクの測定を行った。膝関節伸展の MVIC トルク測定時の対象者の姿勢は、股関節 90°（解剖学的正位=0°）、膝関節角度 90°（解剖学的正位=0°）の仰臥位とし、右内外果の上部を筋力測定装置のアタッチメントに固定した。その際、筋力測定装置の回転中心と膝関節の回転中心が一致するように留意した。また、筋力発揮中に腰部が浮き上がるのを防ぐため、非伸縮性のストラップで腰部をベッドに固定した。足関節底屈の MVIC トルク測定時の対象者の姿勢は、膝関節完全伸展位、足関節 90°（解剖学的正位=90°）の伏臥位とし、足部を筋力測定装置のアタッチメントに固定した。各 MVIC トルクの測定は、ウォーミングアップの後、2 回行われた。対象者には、反動動作を用いずに力を立ち上げ、全力で発揮した筋力を 3 秒間程度維持するように指示した。

筋力測定装置からのトルクの信号は、A/D 変換機（PowerLab/16SP, ADInstruments 社製）を介して、サンプリング周波数 1 kHz でパーソナルコンピュータに記録された。発揮されたトルクは、ピーク値と安静時トルクの差分とした。MVIC トルクは、それぞれ 2 回の測定のうち最高値を代表値とした。

CK の測定は、乾式臨床科学分析装置（レフロトロンプラス, ロシュ・ダイアグノスティクス社製）および CK 試験紙（レフロトロンプラス CKII, ロシュ・ダイアグノスティクス社製）を用いて、指尖より採血した全血から行われた。本測定機器の測定可能範囲は 24.4—約 1400 U/L であった。

C-2. トレッドミルテスト

トレッドミルテストを始める前に体重計（AD-6225A, エー・アンド・デイ社製）にて体重を測定した。トレッドミルテストは、傾斜 1% に設定された大型トレッドミル（Quasar, h/p/cosmos 社製）を用いて、室温 23–24°C に設定したトレーニング環境シミュレータ室内にて行われた。なお、レース前の測定の 1 週間以上前に各対象者に対し、トレッドミル走への慣れおよび測定プロトコルを決めることを目的に予備試験を行った。

トレッドミルテストでは、初めに最大下負荷試験を行い、その後 5 分間の休憩を挟んだ後、最大漸増負荷試験を行った。最大下負荷試験は、ステージ毎に 1.2–1.8 km/h 漸増する測定を 4–7 ステージ（各ステージの走行時間：4 分、ステージ間休息时间：1 分）行った。この際の開始走速度は、予備試験時における HR および RPE の結果を参考に、最後のステージで BLa が 4 mmol/L を超えるよう、対象者毎に設定し、いずれの測定日も同一とした。最大漸増負荷試験は、1 分毎に走速度を 0.6 km/h 漸増させ、設定走速度での走行が不可能になるまで実施された。この際の開始走速度は、予備試験の結果を参考に、6–12 分で走行不可能になるよう対象者毎に設定し、いずれの測定日も同一とした。最大漸増負荷試験においては、検者が対象者に対し激励すると同時に、30 秒間毎に、その次の 30

秒間が走行できるか尋ねた。走行不可能の判断は、対象者自身が次の 30 秒間を走行不可能と意思表示することによって決定された。

最大下負荷試験における測定項目は、 $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , HR, v_{LT} , 血中乳酸蓄積開始点 (Onset of blood lactate accumulation: OBLA) の走速度 (velocity at OBLA: v_{OBLA}), $\% \dot{V}O_{2max}$ at LT, OBLA 時の $\% \dot{V}O_{2max}$ ($\% \dot{V}O_{2max}$ at OBLA) および RPE とした。 $\dot{V}O_2$ と \dot{V}_E を測定するために、各ステージにおける最後の 1 分間の呼気ガスをダグラスバッグによって採集した。酸素濃度と二酸化炭素濃度は、呼気代謝測定装置 (VmaxS 29C, センサーメディアックス社製) を用いて測定された。呼気ガス量を乾式ガスメーター (NDS-2A-T, 品川精器株式会社製) によって測定し、同時にガス温と気圧を計測した。HR の測定には心拍計 (RC3 GPS HR, Polar 社製) を用いた。HR は各ステージにおける最後の 1 分間の平均値を代表値とした。各ステージの走行終了直後に指尖から血液を微量採取し、血中乳酸分析装置 (ラクテート・プロ 2LT-1730, アークレイ株式会社製) によって BLa を測定した。RPE は、Borg (1973) が開発し、小野寺・宮下 (1976) が日本語表示化した 15 段階のスケールを用いて、各ステージの 3 分 30 秒経過時に測定された。

最大漸増負荷試験における測定項目は、 $\dot{V}O_{2max}$, V_{max} , $\dot{V}O_{2max}$ 時の換気量 (Maximal \dot{V}_E : \dot{V}_E max), 最高心拍数 (Maximal HR: HRmax) およびピーク血中乳酸濃度 (Peak BLa) とした。最大下負荷試験と同様の方法を用いて $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E および HR を運動終了まで測定した。BLa は、最大下負荷試験と同様の方法にて、運動終了 1 分および 3 分後に測定した。

LT と OBLA の分析には、乳酸値解析ソフトウェア (MEQNETTMLT MANAGER, アークレイ株式会社製) を用いた。最大下負荷試験における走速度と BLa の関係から 1 点法を用い、自動的に算出された屈曲点の走速度を v_{LT} とした。また、4 mmol/L に相当する走速度を内挿法によって求め、 v_{OBLA} とした。最大下負荷試験における $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , HR および RPE は、レース 5 日前の v_{LT} と v_{OBLA} に最も近い走速度におけるそれぞれの数値 (near@ v_{LT} , near@ v_{OBLA}) を代表値として算出した。なお、対応のある t 検定の結

果, near@vLT (12.0 ± 1.2 km/h) と vLT (12.0 ± 1.3 km/h), near@vOBLA (13.4 ± 1.0 km/h) と vOBLA (13.5 ± 1.0 km/h) との間にはそれぞれ有意な差が認められなかった. $\dot{V}O_{2\max}$ は最大漸増負荷試験における 3-4 本のダグラスバッグに採集された呼気ガスを用いて算出された. $\dot{V}O_{2\max}$ は, 1) $\dot{V}O_2$ のレベリングオフ, 2) BLa が 10 mmol/L 以上, 3) 測定された HR の最高値が年齢から予測された HRmax ($220 - \text{年齢}$) の 90% 以上, 4) RER が 1.1 以上, 5) RPE が 19 以上, の 5 つの指標のうち, 3 つ以上を満たした場合の値とした. Vmax は, 最大漸増負荷試験における最終到達走速度としたが, その走速度において 30 秒間で疲労困憊に至った場合, その走速度から 0.3 km/h を差し引いた値とした. HRmax は, 最大漸増負荷試験中に得られた最も高い HR とした. Peak Bla は, 運動終了 1 分後と 3 分後の BLa のうち, 高い値を採用した.

D. 統計処理

各測定値は, 平均値 \pm 標準偏差で表された. 統計処理には統計処理ソフト (IBM SPSS Statistics 22, SPSS Japan 社製) を用いた. 筋損傷, 生理学的指標およびパフォーマンス指標の各測定値については, 一元配置分散分析によって時間による主効果を検討した. 時間による主効果が有意と認められた場合には, Dunnett 検定により, レース前を対象として, 2 日後および 10 日後の比較を行った. なお, 全ての検定において有意水準は 5% とした.

3) 結果

A. 筋損傷

Figure 1 は, 膝関節伸展の MVIC トルクを測定日別に示したものである. 一元配置分散分析の結果, 時間による有意な主効果が認められた. Dunnett 検定の結果, 2 日後の膝関節伸展の MVIC トルクは, レース前に比べて有意に低下した. しかし, 10 日後とレース

前との間には有意な差が認められなかった。Figure 2 は、足関節底屈の MVIC トルクを測定日別に示したものである。一元配置分散分析の結果、時間による有意な主効果が認められた。Dunnett 検定の結果、2 日後の足関節底屈の MVIC トルクは、レース前に比べて有意に低下した。しかし、10 日後とレース前との間には有意な差が認められなかった。各試行の 2 日後の低下率は、膝関節伸展の MVIC トルクで 10.1%，足関節底屈の MVIC トルクで 4.7%であった。

CK は、レース 2 日後において男性 1 名の測定値が装置の測定可能範囲を超えたため、その 1 名を除いた 6 名を対象に統計処理を行った。一元配置分散分析の結果、時間による有意な主効果が認められた (Figure 3)。Dunnett 検定の結果、2 日後の CK は、レース前に比べて有意に増加した。しかし、10 日後の CK とレース前との間には有意な差が認められなかった。なお、2 日後の測定値が測定可能範囲を超えた対象者の CK は、レース前が 121 U/L、10 日後が 102 U/L であった。

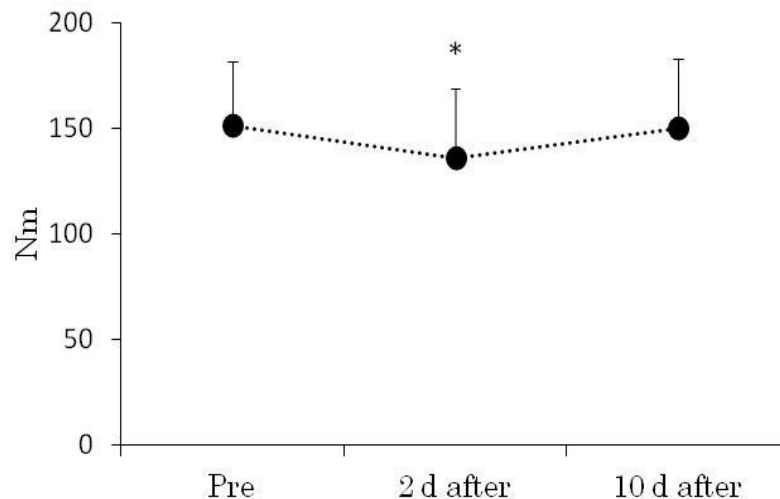


Figure 1 Maximal voluntary isometric contraction torque of knee extension before and after marathon running.
Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

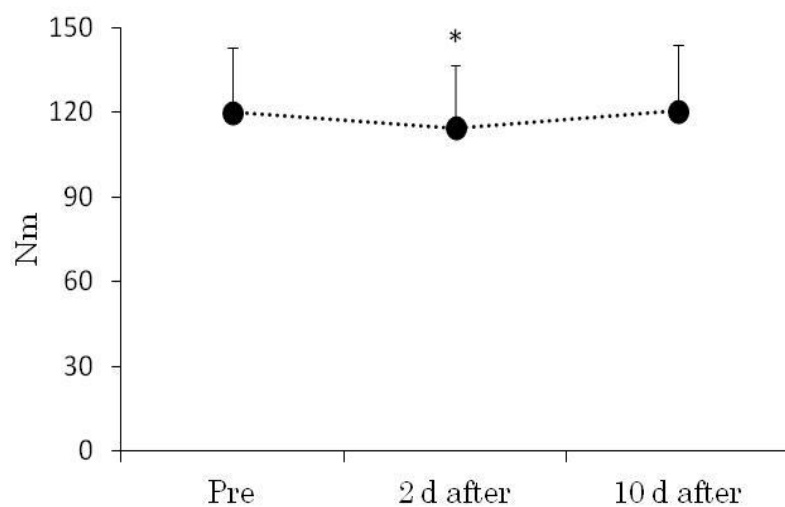


Figure 2 Maximal voluntary isometric contraction torque of plantar flexion before and after marathon running.
Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

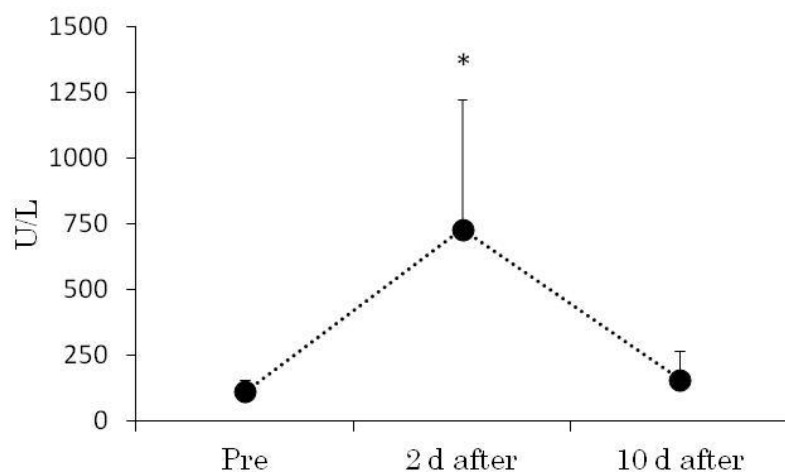


Figure 3 Blood creatine kinase concentration before and after marathon running (n = 6).
Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

B. トレッドミルテスト

トレッドミルテストの前に計測された体重は、レース前が 62.9 ± 7.4 kg, 2 日後が 63.7 ± 7.1 kg, 10 日後が 62.8 ± 7.0 kg であり、レース前に比べ 2 日後で有意に増加した。

vLT (レース前 : 12.0 ± 1.3 km/h, 2 日後 : 11.8 ± 0.9 km/h, 10 日後 : 11.6 ± 1.1 km/h) および vOLBA (レース前 : 13.5 ± 1.0 km/h, 2 日後 : 13.1 ± 1.1 km/h, 10 日

後:13.2 ± 1.3 km/h)は時間による有意な主効果が認められなかった. 同様に, % $\dot{V}O_2$ max at LT (レース前:72.5 ± 4.9%, 2日後:75.0 ± 5.9%, 10日後:71.1 ± 3.1%) および% $\dot{V}O_2$ max at OBLA (レース前:82.9 ± 3.7%, 2日後:84.5 ± 5.6%, 10日後:82.1 ± 3.9%) にも有意な差は認められなかった.

Table 10–11 は, 最大下負荷試験における $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , HR ならびに RPE の結果を示したものである. 絶対値で表された $\dot{V}O_2$ は, 2 日後において, LT および OBLA 相当の走速度で有意に増加した. しかし, 体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_2$ でみると, 有意な差が認められたのは OBLA 相当の走速度のみであった. \dot{V}_E および HR は, 測定日間における有意な差が認められなかった. RPE は, 2 日後に有意に増加した.

Table 12 は, 最大漸増負荷試験の結果を示したものである. $\dot{V}O_2$ max は, 絶対値では時間による有意な主効果は認められなかったが, 体重 1 kg 当たりの値では認められ, 2 日後に低下した. また, Vmax および HRmax も 2 日後に有意に低下した. Peak BLa については, 測定日間における有意な差が認められなかった.

Table 10 Results of the submaximal running test at near of velocity at lactate threshold before and after marathon running.

	Pre	2 d after	10 d after
$\dot{V}O_2$ (L/min)	2.54 ± 0.37	2.64 ± 0.34*	2.55 ± 0.32
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	40.5 ± 4.5	41.5 ± 3.8	40.7 ± 3.5
\dot{V}_E (L/min)	72.8 ± 10.6	82.1 ± 13.8	70.5 ± 10.4
HR (beats/min)	162 ± 16	163 ± 12	159 ± 11
RPE	13.1 ± 1.2	15.0 ± 1.6*	12.7 ± 1.4

Values are expressed as mean ± SD. $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; \dot{V}_E , minute ventilation; HR, heart rate; RPE, ratings of perceived exertion;

* significant difference from Pre (p < 0.05).

Table 11 Results of the submaximal running test at near of velocity at onset of blood lactate accumulation before and after marathon running.

	Pre	2 d after	10 d after
$\dot{V}O_2$ (L/min)	2.90 ± 0.34	3.03 ± 0.42*	2.89 ± 0.36
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	46.2 ± 3.3	47.6 ± 4.2*	46.0 ± 3.2
\dot{V}_E (L/min)	91.5 ± 12.4	97.8 ± 16.5	88.3 ± 15.9
HR (beats/min)	176 ± 13	175 ± 9	171 ± 8
RPE	14.7 ± 1.5	17.0 ± 1.8*	14.4 ± 1.4

Values are expressed as mean ± SD. $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; \dot{V}_E , minute ventilation; HR, heart rate; RPE, ratings of perceived exertion; * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

Table 12 Results of the maximal running test before and after marathon running.

	Pre	2 d after	10 d after
$\dot{V}O_{2max}$ (L/min)	3.53 ± 0.51	3.47 ± 0.52	3.49 ± 0.49
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	56.0 ± 4.0	54.5 ± 4.5*	55.5 ± 4.2
Vmax (km/h)	17.0 ± 1.1	16.4 ± 1.4*	17.1 ± 1.3
\dot{V}_E max (L/min)	128.7 ± 19.2	127.5 ± 20.7	130.2 ± 21.1
HRmax (beats/min)	200 ± 7	194 ± 8*	199 ± 6
Peak BLa (mmol/L)	12.0 ± 3.2	11.5 ± 2.5	13.5 ± 2.5

Values are expressed as mean ± SD. $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen consumption; Vmax, maximal velocity; \dot{V}_E max, minute ventilation at $\dot{V}O_{2max}$; HRmax, maximal heart rate; Peak BLa, peak blood lactate concentration; * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

4. 考察

研究課題 1 では、Novice runner を対象として、マラソンレースの前、2 日後および 10 日後に筋損傷指標、生理学的指標およびパフォーマンス指標を測定した。得られた主な知見は次の 3 点である。1) マラソンレース 2 日後では膝関節伸展筋群と足関節底屈筋群に筋損傷が認められる。2) レース 2 日後における体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_{2max}$ 、RE および Vmax が低下する。3) レース 10 日後には筋損傷は消失し、生理学的指標およびパフォーマンス指標がレース前と同等にまで回復する。これらの結果を踏まえ、マラソンレースが 1) 筋損傷に与える影響、2) 生理学的指標とパフォーマンス指標に与える影響、3) レース後の回復についてそれぞれ考察する。

A. マラソンレース後の筋損傷

CK は、マラソンレース後の筋損傷を評価する指標として多くの先行研究で用いられており、そのいずれもが 2 日後に有意な増加を認めている (Asp et al., 1997, 1999; Clifford et al., 2017; Hill et al., 2014; Howatson et al., 2010; Kobayashi et al., 2005; Kyröläinen et al., 2000; Liang et al., 2001; Martin et al., 2015; Soeder et al., 1989; Tojima et al., 2016). 本研究課題においても、レース前に比べてレース 2 日後の CK が有意に増加していたことから先行研究と同様の結果となった.

マラソンレース前後の MVIC トルクを経時的に測定した先行研究は、主に膝関節伸展を対象動作としている (Clifford et al., 2017; Howatson et al., 2010; Hill et al., 2014). Hill et al. (2014) は、マラソンレースを 3 時間 45 分程度で完走したランナー 12 名を対象として、レースの前、直後、1 日後、2 日後および 3 日後に膝関節伸展の MVIC トルクを測定した結果、レースに出場することで 2 日後まで有意に低下したものの、3 日後にはレース前と同等レベルにまで回復したことを明らかにした. また Howatson et al. (2010) はマラソンレースを 4 時間 15 分 48 秒 ± 1 時間 01 分 22 秒 (平均値 ± 標準偏差) で完走したランナー 10 名を対象にした場合、レース 2 日後の膝関節伸展の MVIC トルクがレース前に比べ 9% の有意な低下であったことを報告している. 本研究課題における膝関節伸展の MVIC トルクはレース前に比べ 2 日後で有意に低下したことから (低下率: 10.1%), これらの先行研究の知見を支持するものであった.

本研究課題では、足関節底屈の MVIC トルクも測定した. 著者らの知る限り、マラソンレース前後の足関節底屈の MVIC トルクを経時的に測定した研究は、Fast runner を対象にした Petersen et al. (2007) の報告に限られる. 彼らはマラソンレースを 2 時間 22 分 37 秒—2 時間 54 分 00 秒で完走した 8 名のランナーを対象に、レース前、直後、2 日後および 5 日後に足関節底屈の MVIC トルクを測定した結果、2 日後まで有意な低下を認めている. Fast runner に比べ、レース中の走速度が低い Novice runner を対象にした本研究

課題においても、レース 2 日後の足関節底屈の MVIC トルクに有意な低下が認められたことは新たな知見である。

本研究課題の結果から、マラソンレース 2 日後の膝関節伸展筋群と足関節底屈筋群には筋損傷が起きていたことが示された。このことは、次に述べる生理学的指標およびパフォーマンス指標に影響を及ぼしていると考えられる。

B. マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標

本研究課題において、レース 2 日後の体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_2\max$ は有意に低下した。しかしながら、その低下の程度は比較的小さく（低下率：2.7%）、絶対値で示すと有意な差が認められなかったことから、体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_2\max$ の低下は体重増加によるものと考えられる。複数のランナーを対象として、マラソンレース後の比較的早い段階で $\dot{V}O_2\max$ を測定した先行研究としては、中年ランナー 6 名（43 歳，中央値）を対象とした Sierra et al. (2016) の報告が挙げられる。この報告では、レース 3—4 日後に測定された $\dot{V}O_2\max$ はレース前に比べ 8.7% の有意な低下を示しており、本研究課題の結果よりも著しかった。研究間の異なる結果の原因としては、対象者の年齢が影響している可能性がある。すなわち、本研究課題における対象者は大学生ランナーであり、年齢は平均値で 23 歳であった。Martin et al. (2015) は、若年ランナー（25—39 歳）とマスターランナー（55 歳以上）を対象にマラソンレース後に心筋マーカーとして CK-MB（Creatine kinase-myocardial band）を測定した結果、マスターランナーの増加が著しかったことを報告した。そして彼らは、この結果に基づき、マラソンレースにおける心臓への負荷はマスターランナーで顕著であると述べている。実際、Sierra et al. (2016) の研究では、レース直後の心筋収縮力（心エコー検査により定量）の低下を認めており、心筋疲労によって有酸素性エネルギー供給能力が低下したと考察している。一方、著者は、これまでに本研究課題と同等の特性を有する大学生ランナーを対象として、マラソンレース 2 日後の左心

室収縮機能はレース前と有意な差がないことを認めている（高山ほか，2016b）．以上を踏まえると，本研究課題と Sierra et al. (2016) の結果の差異は，レース中の心臓への負荷によって説明できるのかもしれない．ただし，Sierra et al. (2016) の研究では，マラソンレースの 3—4 日後に心機能の測定を行っていないため，トレッドミルテスト実施時の心筋疲労の有無については明らかでない．

本研究課題では，各測定日で対象者内の走速度を統一した上で，RE の評価を行った．その結果，絶対値でみた $\dot{V}O_2$ は，LT および OBLA に相当する走速度でレース 2 日後に有意に増加した．しかし，体重 1 kg 当たりでみると，有意な差が認められたのは OBLA に相当する走速度のみであった．すなわち，高強度ランニングの RE の低下が顕著であった．RE は，筋損傷によって低下することが報告されており，その原因としては，筋損傷によってランニング時により多くの筋線維の動員を必要とすることや伸張—短縮サイクルの遂行能力の低下の関与が示唆されている（Chen et al. 2007b）．また，筋損傷による RE の低下は，低—中強度に比べて高強度のランニングにおいて著しい影響を受ける（Chen et al. 2009）．DHR の 2 日後に 70%，80%，90% $\dot{V}O_{2max}$ におけるトレッドミル走を実施した研究では，70% $\dot{V}O_{2max}$ 走行の $\dot{V}O_2$ には DHR 実施前との間に有意な差が認められなかったのに対し，80%および 90% $\dot{V}O_{2max}$ 走行の $\dot{V}O_2$ は有意に増加したことが認められている（Chen et al. 2009）．レース 2 日後には筋損傷が起きていたと同時に，より強度が高い OBLA に相当する走速度（ $84.5 \pm 5.6\% \dot{V}O_{2max}$ ）における RE が低下した本研究課題の結果は，Chen et al. (2009) の知見を支持するものである．以上のことから，レース 2 日後にみられた RE の低下は筋損傷が原因であったと考えられる．

本研究課題において，レース 2 日後の% $\dot{V}O_{2max}$ at LT および% $\dot{V}O_{2max}$ at OBLA には低下が認められなかった．そればかりか，統計学的には有意ではないものの，レース 2 日後の% $\dot{V}O_{2max}$ at LT はレース前に比べると増加傾向にあった（3.5%）．これは，体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_{2max}$ や RE の低下が関係していると考えられる．自転車エルゴメーターを用

いた実験ではあるものの、筋損傷では $\dot{V}O_2$ at VT が低下する場合でも $\dot{V}O_2$ at LT は変化しないことが示されている (Davies et al. 2011). したがって、筋損傷が生じているマラソンレース 2 日後においても、 $\% \dot{V}O_{2\max}$ at LT は低下しないと考えられる.

マラソンレース 2 日後の V_{\max} には有意な低下が認められた (低下率: 5.5%). したがって、マラソンレース 2 日後にはパフォーマンス指標が低下することが示された. V_{\max} は主に $\dot{V}O_{2\max}$ と RE によって規定される指標である (Saunders et al., 2010). また、下肢の最大筋力も V_{\max} に影響を与えることが報告されている (Alves Pasqua et al., 2018). 本研究課題において、レース 2 日後の $\dot{V}O_{2\max}$, RE および下肢の MVIC トルクはいずれも有意に低下していた. したがって、 V_{\max} の低下は、エネルギーの供給能力と経済性の両要因に加え、最大筋力の低下の影響を受けたと考えられる. 一方、 vLT には測定日間での有意差がなかった. vLT は $\% \dot{V}O_{2\max}$ at LT の影響をより受ける指標である. したがって、マラソンレース 2 日後に V_{\max} が低下していたにも関わらず vLT は変化しなかった原因は、これらの指標が $\% \dot{V}O_{2\max}$ に受ける影響の程度によって説明できる可能性がある. また、本研究課題におけるレース 2 日後の vLT には個人間変動が大きく、レース前に比べ 1.0 km/h 以上低下した対象者もいた一方で、1.0 km/h 以上増加した対象者もいた. 最大下強度における BLa は個人内変動が著しいことが報告されていることを踏まえると (Saunders et al., 2004b), 本研究課題における対象者数や BLa の再現性が vLT の結果に影響していた可能性は否定できない.

C. マラソンレース後の回復過程

10 日後の測定では、筋損傷およびトレッドミルテストの全ての評価指標でレース前と比べて有意な差がなかった. 筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係からマラソンレース後の回復過程を検討した先行研究はみあたらないが、各指標を個別に検討したものは存在する. 例えば、膝伸展伸展および足底屈底屈の MVIC トルク (Petersen et

al. 2007) と CK (Asp et al., 1997; 1999; Hill et al., 2014; Kobayashi et al., 2005; Kyröläinen et al. 2000; Liang et al., 2001; Tojima et al., 2016) は, レース後 1 週間以内にはレース前と有意な差が認められないまでに回復する. また, レース 2 週間後の $\dot{V}O_2\text{max}$ は, レース前との間に差が認められない (Noble et al., 1979). 本研究課題においても, 筋損傷が認められた 2 日後の生理学的指標やパフォーマンス指標はレース前に比べ低下したが, 10 日後には有意な差がなかった. すなわち, マラソンレースから 10 日以内にこれらの指標は回復していた. また, このことは, マラソンレース後の筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との間に関係があることを示唆するものである.

5) まとめ

Novice runner を対象とした本研究課題の結果, 以下のことが示された. 1) マラソンレース 2 日後では膝関節伸展筋群と足関節底屈筋群に筋損傷が認められる. 2) レース 2 日後における体重 1 kg 当たりの $\dot{V}O_2\text{max}$, RE および V_{max} が低下する. 3) レース 10 日後では筋損傷は消失し, 生理学的指標およびパフォーマンス指標がレース前と同等にまで回復する.

V. 研究課題 2

マラソンレース後の筋損傷の回復における筋間差と筋損傷から回復した直後の生理学的指標およびパフォーマンス指標

1) 目的

ランニングでは、膝関節伸展筋群に加え、膝関節屈曲筋群と足関節底屈筋群も主働筋として活動する (Novacheck, 1998). しかし、マラソンレース後の筋損傷を検討した多くの先行研究では膝関節伸展筋群を対象部位としており、膝関節屈曲筋群と足関節底屈筋群の回復を検討した報告は数少ない. 研究課題 1 では、マラソンレースの 2 日後における膝関節伸展と足関節底屈の MVIC トルクに有意な低下が認められた. ただし、膝関節屈曲の MVIC トルクを測定していないため、膝関節屈曲筋群の筋損傷については不明である. また、研究課題 1 ではレース後の測定を 2 日後と 10 日後に実施し、10 日後に全ての評価指標がレース前と同等レベルにまで回復していることが明らかとなったが、3 日後から 9 日後に測定を行っていないため、どのタイミングで回復するのかは不明である. マラソンレース後の筋損傷を検討した研究の中には、3 日後には筋損傷が消失している報告がある (Hill et al., 2014; Tojima et al., 2016).

以上を踏まえ研究課題 2 では、Novice runner を対象として、マラソンレース後の筋損傷の回復における筋間差を明らかにすることを目的とした. また、マラソンレース 3 日後の生理学的指標およびパフォーマンス指標を検討した.

2) 方法

A. 対象者と対象レース

対象者は、少なくとも 1 日 30 分程度のランニングを週に 2 回以上、習慣的に実施している大学生 7 名 (男性: 7 名, 年齢: 22 ± 2 歳, 身長: 172 ± 4 cm, 体重: 68.5 ± 3.2

kg, マラソン完走経験 : 1.0 ± 1.1 回, 月間走行距離 : 191 ± 177 km) であった。研究課題 2 の対象者の中には陸上競技部や地域のランニングクラブに所属している者はいなかった。

対象者は、2015 年 1 月に開催された日本陸上競技連盟公認のマラソンレースである第 34 回いぶすき菜の花マラソンに出場し、4 時間 30 分 50 秒 \pm 58 分 25 秒 (3 時間 09 分 56 秒—5 時間 42 分 56 秒) で完走した。スタート時における大会地域の気温は 12.5°C 、天候は晴れ、風速は 0.2 m/s であった。

B. 実験デザイン

本研究課題における測定はレースの 4 日前 (レース前)、1 日後、2 日後および 3 日後に行われた。レース前と 3 日後には筋損傷とトレッドミルテストの測定を行った。この際、先に筋損傷の測定を行い、次にトレッドミルテストを行った。1 日後および 2 日後には筋損傷の測定のみ行った。トレッドミルテストの実施時間は、対象者内で同一の時間帯とし、測定開始 3 時間前から水以外の飲食物の摂取を禁じた。

C. 実験内容

C-1. 筋損傷

本研究課題では、筋損傷指標として膝関節伸展、膝関節屈曲、足関節底屈の MVIC トルク、CK および筋痛を測定した。

MVIC トルクと CK の測定は、研究課題 1 と同じ方法で行われた。なお、膝関節屈曲の MVIC トルクは、膝関節伸展の MVIC トルクの測定と同様の姿勢で行われた。

筋痛は、Visual Analog Scale (VAS) を用い 10 cm の直線の左端を 0 (全く痛みなし)、右端を 10 (最大の痛み) とし、大腿前部、大腿後部および下腿後部を対象部位とした。対象者はハーフスクワット動作時 (大腿前部および大腿後部) ならびにカーフレイズ動作時

(下腿後部)の痛みのレベルを回答した。

C-2. トレッドミルテスト

トレッドミルテストを始める前に体重計 (AD-6225A, エー・アンド・デイ社製) によって体重を測定した。トレッドミルテストは、傾斜 1%に設定されたトレッドミル (BM-1100, S&ME 社製) を用いて、室温 14–16 °Cに設定した実験室にて行われた。なお、レース前の測定の 1 週間以上前に各対象者に対し、トレッドミル走への慣れを目的に予備試験を行った。

トレッドミルテストでは、はじめに予測されたマラソンの走速度 (velocity at predicted marathon: v_M) を用いた最大下固定負荷試験を行い、その後 5 分間の休憩を挟んだ後、最大漸増負荷試験を実施した。最大下固定負荷試験の運動時間は 6 分とし、 v_M は予備試験で判定した対象者の走力をもとに著者が決定した。なお、対応のある t 検定の結果、 v_M (10.1 ± 1.6 km/h) とマラソンの平均走速度 (9.8 ± 2.0 km/h) との間には有意な差が認められなかった。最大漸増負荷試験は、1 分毎に速度を 0.6 km/h 漸増させ、設定速度での走行が不可能になるまで実施された。この際の開始走速度は、予備試験の結果を参考に、6–12 分で走行不可能になるよう対象者毎に設定された。最大漸増負荷試験においては、検者が対象者に対し激励すると同時に、30 秒間毎に、その次の 30 秒間が走行できるか尋ねた。走行不可能の判断は、対象者自身が次の 30 秒間を走行不可能と意思表示することによって決定された。

最大下固定負荷試験における測定項目は、 $\dot{V}O_2$, \dot{V}_E , HR, BLa および RPE とした。最大漸増負荷試験における測定項目は、 $\dot{V}O_{2max}$, V_{max} , \dot{V}_{Emax} , HRmax および Peak BLa とした。これらの指標は、研究課題 1 と同じ方法によって測定した。

D. 統計処理

各測定値は、平均値±標準偏差で表された。統計処理には統計処理ソフト（IBM SPSS Statistics 22, SPSS Japan 社製）を用いた。筋損傷の各測定値については、一元配置分散分析によって時間による主効果を検討した。時間による主効果が有意と認められた場合には、Dunnett 検定により、レース前を対象として、2 日後および 10 日後の比較を行った。トレッドミルテストの各測定値については、対応のある t 検定を行った。なお、全ての検定において有意水準は 5%とした。

3) 結果

A. 筋損傷

Figure 4 は、各試行の MVIC トルクを測定日別に示したものである。一元配置分散分析の結果、膝関節伸展および膝関節屈曲の MVIC トルクには時間による有意な主効果が認められた。Dunnett 検定の結果、膝関節伸展の MVIC トルクは 2 日後まで、膝関節屈曲の MVIC トルクは 1 日後まで、それぞれ有意な低下が認められた。足関節底屈の MVIC トルクには時間による有意な主効果がなかった。各試行の 1 日後、2 日後、3 日後の低下率は、膝関節伸展の MVIC トルクで 12.0%, 8.1%, 2.5%, 膝関節屈曲の MVIC トルクで 12.5%, 5.9%, 1.4%, 足関節底屈の MVIC トルクで 6.4%, 4.1%, 2.6%であった。

レース前の CK の測定において、1 名の対象者の測定値が非常に高かったため（1150 U/L）、スミルノフ - グラブスの棄却検定を行った。その結果、外れ値と判定されたため、その 1 名を除いた 6 名を対象に統計処理を行った。一元配置分散分析の結果、時間による有意な主効果が認められた（Figure 5）。Dunnett 検定の結果、CK はレース前に比べて 2 日後まで有意に増加した。しかし、3 日後の CK とレース前との間には有意な差が認められなかった。

Figure 6 は、各部位の筋痛を測定日別に示したものである。一元配置分散分析の結果、時間による有意な主効果が認められたのは、大腿前部のみであり、2 日後まで有意な増加

が認められた.

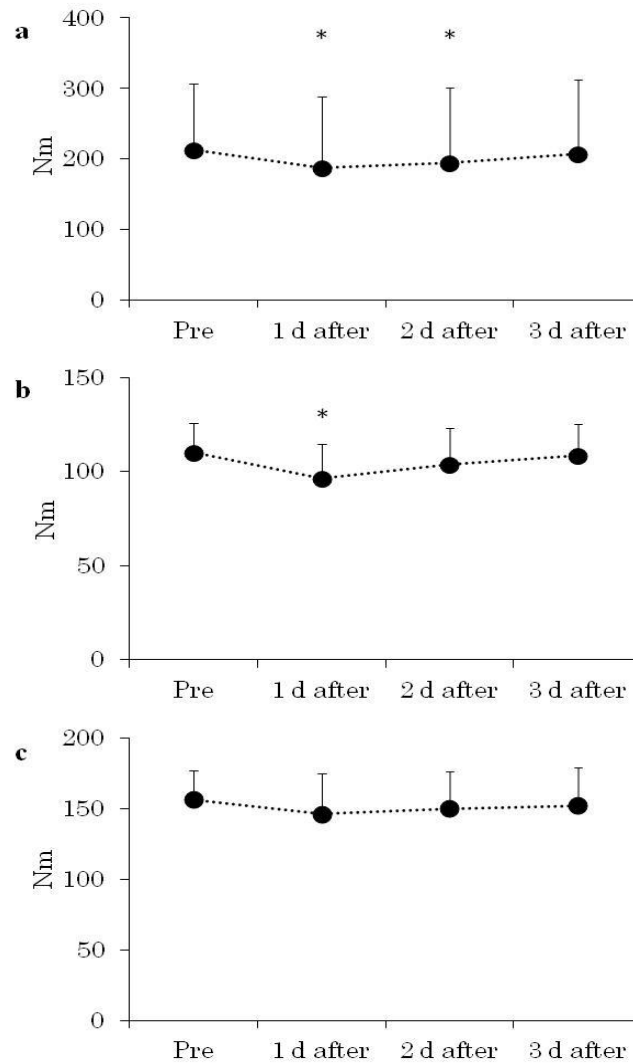


Figure 4 Maximal voluntary isometric contraction torque of knee extension (a), knee flexion (b), and plantar flexion (c) before and after marathon running.

Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

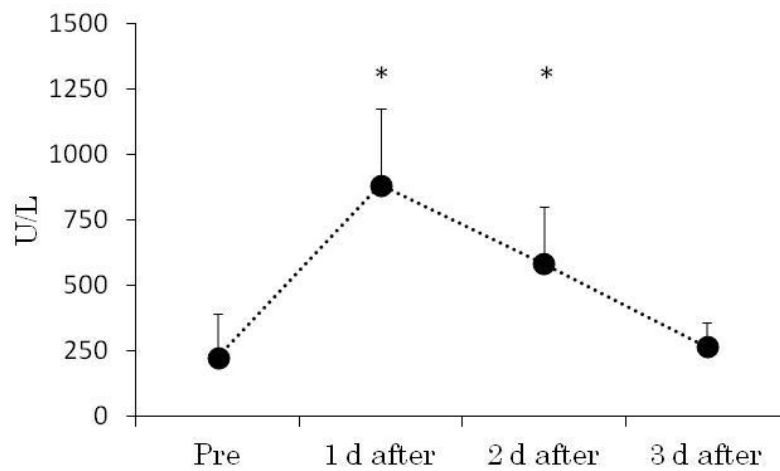


Figure 5 Blood creatine kinase concentration before and after marathon running (n = 6). Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

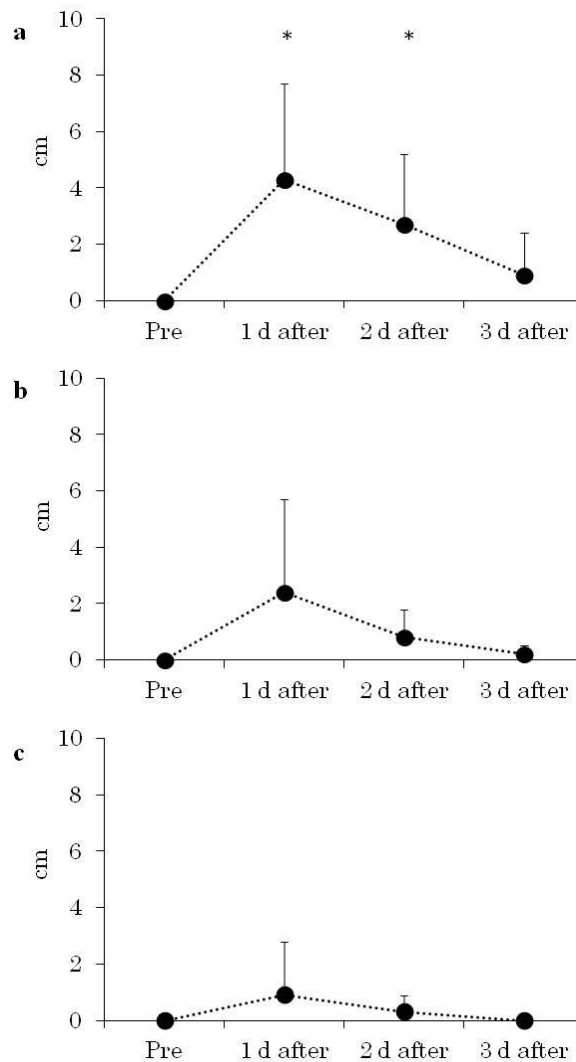


Figure 6 Muscle soreness of knee extensors (a), knee flexors (b), and plantar flexors (c) before and after marathon running. Values are expressed as mean \pm SD. * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

B. トレッドミルテスト

トレッドミルテストの測定前に計測された体重は、レース前が 68.5 ± 3.2 kg, 3 日後が 67.9 ± 2.5 kg であり、有意な差がなかった。

Table 13 は、最大下固定負荷試験の結果を示したものである。 \dot{V}_E および RPE はレース前に比べ 3 日後で有意に増加した。一方、 $\dot{V}O_2$, HR, BLa には測定日間での有意な差がなかった。

Table 14 は、最大漸増負荷試験の結果を示したものである。全ての評価指標において測定日間での有意な差がなかった。

Table 13 Results of the submaximal running test before and after marathon running.

	Pre	3 d after
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	35.9 ± 6.3	36.1 ± 5.7
\dot{V}_E (L/min)	67.2 ± 17.5	$72.1 \pm 17.7^*$
HR (beats/min)	144 ± 14	147 ± 13
BLa (mmol/L)	2.1 ± 0.7	2.0 ± 0.7
RPE (L/min)	11 ± 1	$12 \pm 2^*$

Values are expressed as mean \pm SD. $\dot{V}O_2$, oxygen consumption; \dot{V}_E , minute ventilation; HR, heart rate; BLa, blood lactate concentration; RPE, ratings of perceived exertion; * significant difference from Pre ($p < 0.05$).

Table 14 Results of the maximal running test before and after marathon running.

	Pre	3 d after
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg/min)	56.3 ± 4.2	55.3 ± 3.8
Vmax (km/h)	17.2 ± 1.1	16.8 ± 1.3
\dot{V}_E max (L/min)	135.7 ± 9.3	141.5 ± 12.0
HRmax (beats/min)	197 ± 5	194 ± 8
Peak BLa (mmol/L)	10.4 ± 2.9	10.3 ± 3.9

Values are expressed as mean \pm SD. $\dot{V}O_{2max}$, maximal oxygen consumption; Vmax, maximal velocity; \dot{V}_E max, minute ventilation at $\dot{V}O_{2max}$; HRmax, maximal heart rate; Peak BLa, peak blood lactate concentration.

4. 考察

研究課題 2 では、Novice runner を対象として、マラソンレースの前と 1-3 日後に筋損傷指標を測定した。さらに、レースの前と 3 日後にはトレッドミルテストによって生理学的指標およびパフォーマンス指標を測定した。得られた主な知見は次の 2 点である。1) マラソンレースによる筋損傷は膝関節伸展筋群で最も著しい。2) マラソンレース 3 日後には筋損傷は消失し、生理学的指標およびパフォーマンス指標も回復する。これらの結果を踏まえ、マラソンレースが 1) 筋損傷の筋間差に与える影響、2) 筋損傷から回復した直後の生理学的指標およびパフォーマンス指標についてそれぞれ考察する。

A. 筋損傷の筋間差に与える影響

本研究課題では、MVIC トルクと筋痛の回復過程に筋間差が認められ、膝関節伸展筋群において回復するまでに長時間を要した。このことは、マラソンレース後の筋損傷は、膝関節伸展筋群で最も著しいことを示している。筋損傷は伸張性収縮によって引き起こされると言われている (Nosaka et al., 2002)。マラソンのような長時間ランニングにおいて、ランナーは数万回にわたり体重の数倍の着地衝撃を受けるが (Cavanagh and LaFortune, 1980)、このとき身体を支える働きをするために膝関節伸展筋群には伸張性収縮が起こる (Sanchez et al., 2006)。したがって、本研究課題における膝関節伸展筋群の筋損傷が著しかった原因は、マラソンレースにおける伸張性収縮の負荷を反映した結果だと考えられる。

研究課題 1 の結果とは異なり、本研究課題においては足関節底屈 MVIC トルクには時間による有意な主効果が認められなかった。ただし、レース 2 日後の低下率でみた場合、両研究課題の結果は類似していた (研究課題 1: 4.7%, 研究課題 2: 4.1%)。一方、Fast runner を対象とした Petersen et al. (2007) の研究では、足関節底屈の MVIC トルクにはレース 2 日後にも 25.4% の有意な低下が認められており、足関節底屈筋群の筋損傷が著しいこと

を示している。研究間の異なる結果の原因としては、レース中の絶対的な運動強度（走速度）の差異が関係している可能性がある。実際、Fast runner における足関節底屈の MVIC トルクの低下が著しい原因について Petersen et al. (2007) は、長いストライドを伴う長時間高強度運動が立脚期後半の足関節底屈筋群の歪みに寄与し、そのことが筋に著しい損傷を与えたと推察している。一方、本研究課題で対象としたような Novice runner の場合、ストライドは短いことから (Mercer et al., 2002)、足関節底屈筋群への負荷は低かったと推察される。以上を踏まえると、マラソンレース後の足関節底屈筋群の筋損傷は Fast runner で著しい可能性が考えられる。また、Novice runner においては、膝関節伸展筋群に比べると、足関節底屈筋群の筋損傷は軽微だと考えられる。

B. 筋損傷から回復した直後の生理学的指標およびパフォーマンス指標

本研究課題では、マラソンレースの 3 日後にトレッドミルテストを行うことで生理学的指標およびパフォーマンス指標を測定した。結果論にはなるものの、筋損傷指標にはレース前と 3 日後との間で有意差がなかったことから、本研究課題におけるトレッドミルテストは、筋損傷から回復した直後に行ったことになる。その結果、RE を示す最大下固定負荷試験における $\dot{V}O_2$ と最大漸増負荷試験における $\dot{V}O_{2max}$ はレース前と比べ有意な変化が認められなかった。また、パフォーマンス指標である V_{max} もレース前と同等の結果であった。これに対し、研究課題 1 では、筋損傷が認められた 2 日後の生理学的指標およびパフォーマンス指標には有意な低下が認められていた。本研究における二つの研究課題の結果を踏まえると、マラソンレース後においても、筋力トレーニングあるいは DHR を対象として行われた研究と同様に、筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との間に関係があると考えられる。つまり、マラソンレース後、筋損傷が生じている期間における生理学的指標およびパフォーマンス指標は低下し、筋損傷から回復した場合、その現象は認められなくなる可能性が高い。

5) まとめ

本研究課題の結果，以下のことが示された． 1) **Novice runner** では，マラソンレースによる筋損傷は膝関節伸展筋群で最も著しい． 2) **Novice runner** では，マラソンレース 3 日後には筋損傷は消失し，生理学的指標およびパフォーマンス指標も回復する．

VI. 研究課題 3

マラソンレース 1 週間後における生理学的指標およびパフォーマンス指標

1) 目的

マラソンレースのほとんどは週末に開催されており，毎週の頻度でレースに出場するランナーもいる．しかし，マラソンレースから 1 週間後の生理学的指標およびパフォーマンス指標を検討した研究はほとんどない．研究課題 2 において，Novice runner を対象とした場合，レース 3 日後には筋損傷は消失し，生理学的指標およびパフォーマンス指標も回復することが示された．しかし，研究課題 2 における対象者の完走時間は平均で 4 時間 30 分であり，対象者 7 名のうち 3 名がレース途中で歩いていた．したがって，Trained runner を対象とした場合，マラソンレース後 1 週間以内に生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復するのかは不明である．

以上を踏まえ研究課題 3 では，マラソンレース 1 週間後における生理学的指標およびパフォーマンス指標を明らかにすることを目的とした．

2) 方法

A. 対象者と対象レース

対象者は，少なくとも 1 日 30 分程度のランニングを週に 2 回以上，習慣的に実施している大学生 11 名（男性：6 名，女性：5 名，年齢： 25 ± 4 歳，身長： 168 ± 9 cm，体重： 62.0 ± 9.8 kg，月間走行距離： 215 ± 145 km）であった．研究課題 3 における対象者の中には大学の陸上競技部（2 名），トライアスロン部（3 名），陸上同好会（2 名）の在籍経験者が含まれていた．

対象者は，2015 年 11 月（8 名）あるいは 2016 年 11 月（3 名）に開催された日本陸上競技連盟公認のマラソンレースであるつくばマラソンに出場し，3 時間 36 分 20 秒 \pm 41 分

34 秒（2 時間 31 分 22 秒—4 時間 54 分 48 秒）で完走した．スタート時の大会地域の気象条件は，2015 年で気温は 12.4 °C，風速は 2.5 m/s，曇りであり，2016 年で気温は 10.1 °C，風速は 2.0 m/s，曇りであった．

B. 実験デザイン

本研究課題では，トレッドミルテストをレースの 1—2 週間前（レース前）および 7 日後に実施した．トレッドミルテストの実施時間は，対象者内で同一の時間帯とし，測定開始 3 時間前から水以外の飲食物の摂取を禁じた．また，レースの前と 1—7 日後には筋痛を評価した．

C. 実験内容

C-1. トレッドミルテスト

トレッドミルテストを始める前に体重計（TBF-102，タニタ社製）によって体重を測定した．トレッドミルテストは，傾斜 1%に設定された大型トレッドミル（ORK7000，大武ルート工業社製）を用いて，室温が 22—24°Cに設定された実験室内にて行われた．

トレッドミルテストは，最大下固定負荷試験と最大漸増負荷試験の 2 種類によって構成された．はじめに，RE の測定を目的とした 5 分間の最大下固定負荷試験を実施した．最大下固定負荷試験の走速度は各対象者のマラソンレースの目標ペースの 85%に相当する走速度とした．最大下固定負荷試験から 5 分間の休息を挟み，最大漸増負荷試験を行った．最大漸増負荷試験は，8.4 km/h から 1 分毎に走速度を 0.6 km/h 漸増させ，対象者が走行不可能になるまで行われた．走行不可能の判断は，対象者自身が走行不可能と意思表示することによって決定した．走行中の呼気ガスは，自動ガス分析器（AE-310-s エアロモニター，ミナト医科学社製）を用いて呼気ガス採集法により分析し， $\dot{V}O_2$ ， $\dot{V}CO_2$ ， \dot{V}_E および RER を測定した．呼気ガスのサンプリング間隔は，20 秒間に設定した．測定前に校正ガ

スおよび流量校正器を用いてキャリブレーションを行った。また、心拍計（M400 HR, Polar 社製）を用いて HR の測定を行った。RPE は Borg (1973) が開発し、小野寺・宮下 (1976) が日本語表示化した 15 段階のスケールを用いて、最大テストの終了時に測定された。

分析項目は、最大下固定負荷試験における $\text{O}_2 \text{ cost}$, 最大漸増負荷試験における VT, $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$, HRmax および Vmax とした。VT は $\% \dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ ($\% \dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ at VT) ならびに走速度 (vVT) によって表された。 $\text{O}_2 \text{ cost}$ は、最大下負荷試験の最後の 1 分間における平均値をもとに 1 km を走行するのに必要な酸素需要量によって表された (ml/kg/km)。VT は RER が 1.0 を超えて 1.0 未満に低下しなくなった最初の 20 秒間のデータとした (Solberg et al., 2005)。 $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ は、最大漸増負荷試験における最も高い 20 秒間のデータとし、以下の 4 つの評価基準のうち、3 つ以上を満たすことを条件とした。1) $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ のレベリングオフ、2) 測定された HR の最高値が年齢から予測された HRmax (220-年齢) の 90% 以上、3) RER が 1.1 以上、4) RPE が 19 以上。Vmax は、最後に到達できた走速度としたが、最終ステージの途中で走行不可能になった場合は、前のステージの走速度に最終ステージの経過時間の割合を加えて表された。

C-2. 筋痛

筋痛の評価には、0 から 10 までの 11 段階 (0: 痛みがない—10: 最悪の痛み) の NRS (Numerical Rating Scale) を用いた。対象者は各部位を伸ばしたときの痛み (伸張痛) のレベルを回答した。対象部位は、大腿前部、大腿後部、下腿後部、臀部、上背部、下背部、腹部、肩部、上腕前部および上腕後部とした。なお、レース前と 7 日後の評価は、トレッドミルテストの前に行われた。レースの 1-6 日後の評価は、毎日、夕方以降に行われた。

D. 統計処理

各測定値は、平均値±標準偏差で表された。統計処理には統計処理ソフト（IBM SPSS Statistics 22, SPSS Japan 社製）を用いた。各部位の筋痛については、一元配置分散分析によって時間による主効果を検討した。時間による主効果が有意と認められた場合には、Dunnett 検定によって、レース前を対象として、1—7 日後の比較を行った。トレッドミルテストの各測定値については、対応のある t 検定を行った。また、レース前と 1 週間後におけるトレッドミルテストの各測定項目の差の程度を示すために、効果量として Cohen's d を算出した (Cohen, 1988)。この際、効果の程度を小（絶対値で 0.20 以上 0.50 未満）、中（絶対値で 0.50 以上 0.80 未満）、大（絶対値で 0.80 以上）とした。なお、全ての検定において有意水準は 5%とした。

3) 結果

A. トレッドミルテスト

トレッドミルテストの測定前に計測された体重は、レース前が 62.0 ± 9.8 kg, 7 日後が 62.2 ± 9.9 kg であり、有意な差がなかった。

Table 15 は、最大下固定負荷試験および最大漸増負荷試験の生理学的指標を示したものである。全ての測定指標において、測定日間での有意な差は認められなかった。また、小以上の効果量はなかった。

Figure 7 は、vVT および Vmax を示したものである。両指標ともにレース前後における有意差はなく、効果量も認められなかった。

Table 15 Results of the treadmill running test before and 7 days after marathon running.

	Pre	7 d after	Effect size
O ₂ cost (ml/kg/km)	221.0 ± 14.9	221.2 ± 11.2	0.02 (trivial)
% $\dot{V}O_2$ max at VT (%)	85.8 ± 4.7	85.3 ± 4.6	−0.10 (trivial)
$\dot{V}O_2$ max (ml/kg/min)	59.3 ± 9.5	58.1 ± 9.2	−0.12 (trivial)

Values are expressed as mean ± SD. % $\dot{V}O_2$ max at VT, percent utilization of maximal oxygen consumption at ventilatory threshold; $\dot{V}O_2$ max, maximal oxygen uptake.

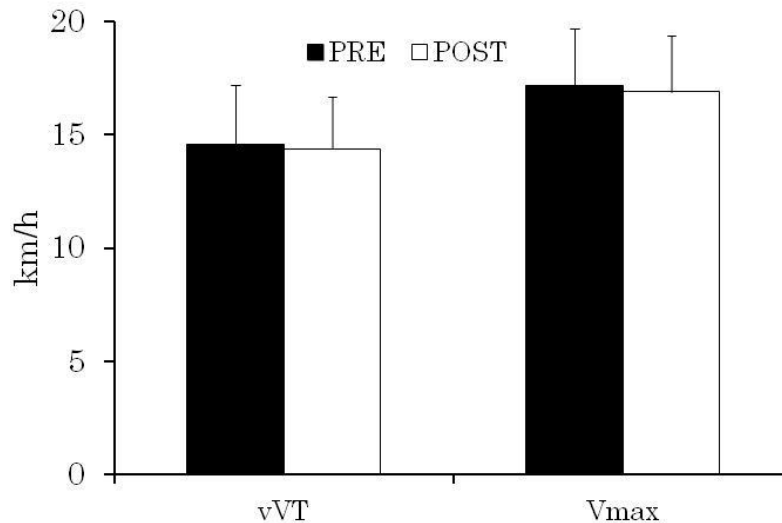


Figure 7 Performance variables before and 7 days after a marathon race.
Values are expressed as mean ± SD.

B. 筋痛

Figure 8 は、マラソンレース前後における各部位の筋痛の経日変化を示したものである。一元配置分散分析の結果、全ての部位を対象として時間による有意な主効果が認められた。ただし、Dunnett 検定の結果、4—7 日後とレース前との間に有意な差を認めた部位はなかった。

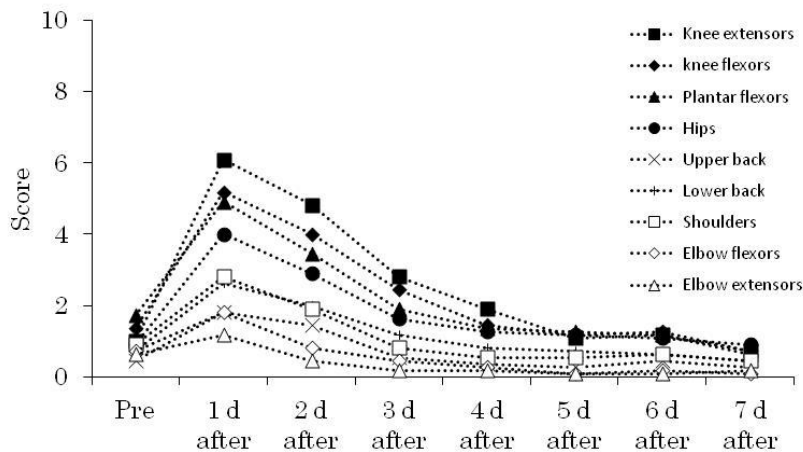


Figure 8 Muscle soreness before and up to the 7 days after marathon running.
Values are expressed as mean.

4. 考察

研究課題 3 では, **Trained runner** を対象として, マラソンレースの前と 1 週間後にトレッドミルテストを実施した. 本研究課題における主な知見は, **Trained runner** を対象としても, マラソンレース 1 週間後には生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復していたことである.

著者の知る限り, 本研究課題は, マラソンレース 1 週間後の生理学的指標およびパフォーマンス指標を体系的に検討した最初の研究である. その結果, トレッドミルテストの全指標において, レース前と 7 日後との間に有意な差が認められなかった. また, 効果量も全てにおいて 0.20 未満であり, 小以上の効果量を示したものはなかった. 特に本研究課題では, 研究課題 1・2 とは異なり, レースパフォーマンスの高いランナーも対象者に含まれていた. 具体的には, レースを 3 時間未満で完走した **Fast runner** が 3 名存在し, うち 1 名は総合 8 位に入賞するほどの記録であり, また対象者全員の平均記録は研究課題 1・2 に比べて約 1 時間短かった. これらの結果を踏まえると, マラソンレースの記録と密接な関係を持つ生理学的指標およびパフォーマンス指標は, レースパフォーマンスの高いランナーを対象としても, マラソンレース後 1 週間以内に回復すると考えられる.

VII. 研究課題 4

様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有するランナーにおける マラソンレース後の筋痛

1) 目的

筋損傷は、運動強度 (Paschalis et al., 2005b; Tiidus and Ianuzzo, 1983) やトレーニング状況 (Schwane et al., 1987) によって程度が異なることが知られている。したがって、マラソンレース後においても、レースの完走時間やレース前の走行距離といった変数と筋損傷との間には関連が認められる可能性がある。マラソンレース後の筋損傷は生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を決定する要因になり得るという研究課題 1・2 の結果を踏まえると、マラソンレース後の筋損傷の個人差を明らかにできれば、レース後の回復を促進することを目的としたレース前のトレーニング戦略を講じる際の参考資料となる。

以上を踏まえ研究課題 4 では、様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有するランナーを対象として、マラソンレース後の筋損傷について筋痛を評価指標として明らかにすることを目的とした。

2) 方法

A. 対象者と対象レース

本研究課題では、筑波大学自由科目「つくばマラソン」の授業履修者あるいはティーチング・アシスタントの大学生・大学院生 91 名に対し、レースの 2 日前に質問紙を配布した。「つくばマラソン」の授業は、陸上競技中長距離走の経験者から運動習慣のない者まで幅広い経験を持つ履修者がおり、レースの完走時間が 3 時間未満から 5 時間以上の者までいる (鍋倉ほか, 1996)。本研究課題における最終的な対象者は、アンケートの提出者 47

名のうち、レースを完走できなかった 2 名および記入が不十分であった 3 名を除いた 42 名（男性 24 名、女性 18 名）とした（有効回収率：46%）。

対象者は、2016 年 11 月に開催された日本陸上競技連盟公認のマラソンレースである第 36 回つくばマラソンに出場し、完走した。スタート時における大会地域の気温は 10.1 °C、天候は晴れ、風速は 2.0 m/s であった。

B. 研究デザイン

本研究課題では、マラソンレース後の筋痛を明らかにするために、レースの 1 日前および 1—7 日後において質問紙法による調査を行った。

C. 調査内容

C-1. レース前の調査項目

対象者は、レースの 1 日前に、1) 目標時間、2) ランニング歴、3) 最近 3 カ月間の走行距離（走行距離）、4) 過去 3 カ月以内における 1 回の練習で走った最長距離（最長距離）、5) マラソン出場回数、6) 身長・体重、7) 慢性的な痛み（ランニング障害）の有無、8) 全身 10 部位の筋痛を回答した。このうち、全身 10 部位の筋痛については、大腿前部、大腿後部、下腿後部、臀部、上背部、下背部、腹部、肩部、上腕前部および上腕後部を対象部位とした。筋痛の評価は、研究課題 3 と同様の方法で行われた。

C-2. レース後の調査項目

対象者は、レース 1—7 日後にかけて全身 10 部位の筋痛を回答した。筋痛の記録はレース前と同様の方法で行われた。また、レース 7 日後には、1) 筋痛が日常生活に与えた影響、2) レース後の練習状況を回答した。このうち、筋痛が日常生活に与えた影響については、「大きく影響した」、「はっきり影響した」、「少し影響した」、「ほとんど影響しない」、

の 4 件法で回答した。また、「大きく影響した」「はっきり影響した」と答えた対象者は、影響が大きかったものとし、影響を与えた期間を日数で回答した。

D. データの処理

目標時間と完走時間はそれぞれ走速度 (km/h) に変換し、目標ペースとレースペースとした。この際、完走時間については大会提携組織 (ランナーズアップデート, アールビーズ) が公開するネットタイムを用いた。本研究課題では、レースペースを絶対的パフォーマンス、目標ペースに対するレースペースの達成率を相対的パフォーマンス (レースペース÷目標ペース×100) とした (Johnson et al., 2015)。

筋痛の程度を評価する指標として筋痛の曲線下面積を用いた (Ishikura et al., 2014)。筋痛の曲線下面積は、レースの 1 日前から 7 日後における筋痛をもとに台形法により算出した。この際、各日における筋痛の代表値は、全身 10 部位の筋痛を平均した数値を用いた。

E. 統計処理

数値は、中央値 (四分位範囲) または百分率で表された。統計処理には統計処理ソフト (IBM SPSS Statistics 22, SPSS Japan 社製) を用いた。各部位の筋痛の経日変化については、Friedman 検定と多重比較を行った。走行距離、最長距離、絶対的パフォーマンスおよび相対的パフォーマンスについては、中央値をもとにそれぞれ上位群、下位群に分類した。筋痛の曲線下面積における群間および男女間の比較には Mann-Whitney U 検定を用いた。筋痛が日常生活に与えた影響の比較にはカイ二乗検定を用いた。なお、全ての検定において有意水準は 5% とした。

3) 結果

A. 対象者の特徴

Table 16 は、本研究課題における対象者の特徴を示したものである。年齢は 23 (2) 歳、身長は 165 (15) cm、体重は 54.5 (9.8) kg であった。目標ペースは 9.4 (2.1) km/h、レースペースは 9.4 (2.3) km/h であり、相対的パフォーマンスは 100 (9) %であった。ランニング歴は 1 (3) 年、走行距離は 150 (116) km、最長距離は 26 (13) km であった。対象者のうち、52%がマラソン出場経験を有しており、出場回数は 1 (2) 回であった。また、10%の対象者がレース前に慢性的な痛みを抱えていた（うち 3 名は膝痛、1 名はシンスプリント）。

Table 16 Characteristics of the subjects.

	Median (interquartile range)	Min–Max
Age (years)	23 (2)	19–35
Height (cm)	165 (15)	148–181
Body weight (kg)	54.5 (9.8)	40–82
Target pace (km/h)	9.4 (2.1)	7.7–17.2
Absolute performance (km/h)* ¹	9.4 (2.4)	6.8–17.1
Relative performance (%) ^{*2}	100 (9)	80–116
Running experience (years)	1.0 (3.4)	0.5–12.0
Running training distance (km)	150 (116)	30–1150
Longest training session (km)	26 (13)	10–42

*¹ Absolute performance indicates race pace.

*² Relative performance indicates race pace / target pace × 100.

B. 筋痛の経日変化

Figure 9 は各部位の筋痛の経日変化を示したものである。Friedman 検定の結果、全ての部位において有意な主効果が認められた。多重比較の結果、レース前との有意差が消失した日は、大腿前部が 6 日後、大腿後部、下腿後部、臀部が 5 日後、上背部、下背部、腹部、肩部、上腕前部が 4 日後、上腕後部が 3 日後であった。

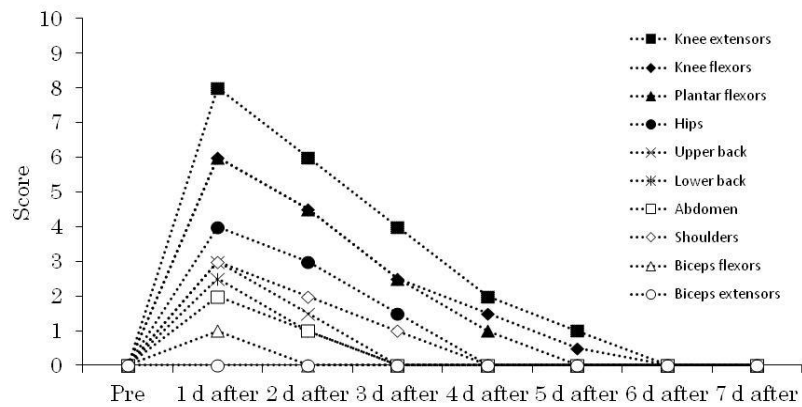


Figure 9 Muscle soreness before and up to the 7 days after marathon running.
Values are expressed as median.

C. その他のレース後の調査項目

筋痛が日常生活に与えた影響が大きかったと回答した対象者は 70%にのぼり，2 (1) 日後まで影響を与えていた．対象者のうち 26%がレース後 1 週間以内にトレーニングを再開しており，その走行距離は 10 (18) km であった．

D. 群間の比較

4 つの変数（走行距離，最長距離，絶対的パフォーマンス，相対的パフォーマンス）について上位群と下位群に分けて筋痛の曲線下面積を比較したところ，走行距離にのみ有意な群間差が認められ，上位群の筋痛の曲線下面積は有意に小さかった（Figure 10）．

男女間の筋痛の曲線下面積に有意な差が認められなかった（男性：8.7 (8.7)，女性：10.0 (7.0))．

筋痛が日常生活に与えた影響についてカイ二乗検定を行った結果，走行距離と最長距離の群間において，それぞれ回答率に有意差が認められた（Figure 11, Figure 12）．走行距離の群間での比較では，上位群の「大きく影響した」は有意に低く，「少し影響した」は有意に高かった．最長距離の比較では，上位群の「大きく影響した」が有意に低かった．

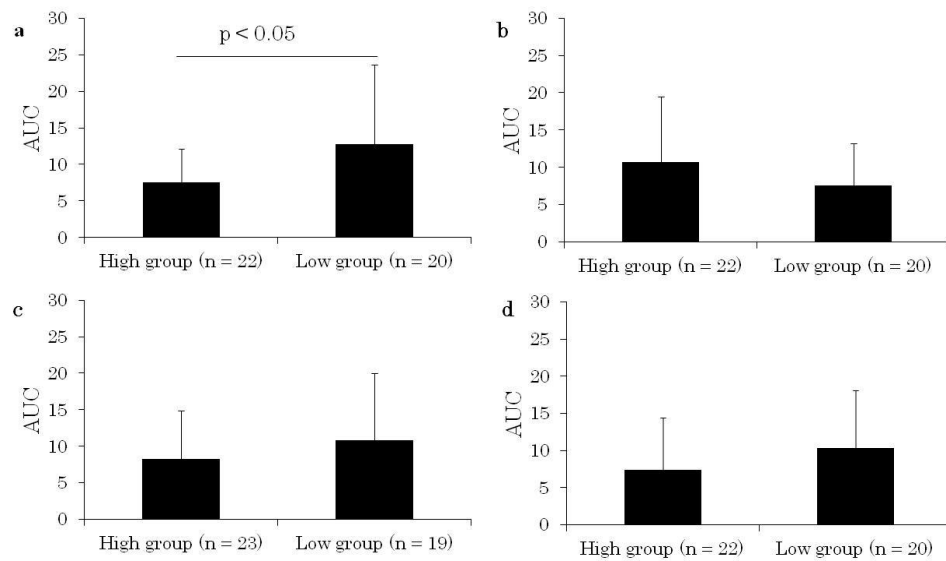


Figure 10 Comparison of area under the curve of muscle soreness between subgroups (training volume (a), longest training session (b), absolute performance (c), and relative performance (d)).

Values are expressed as median \pm interquartile range.

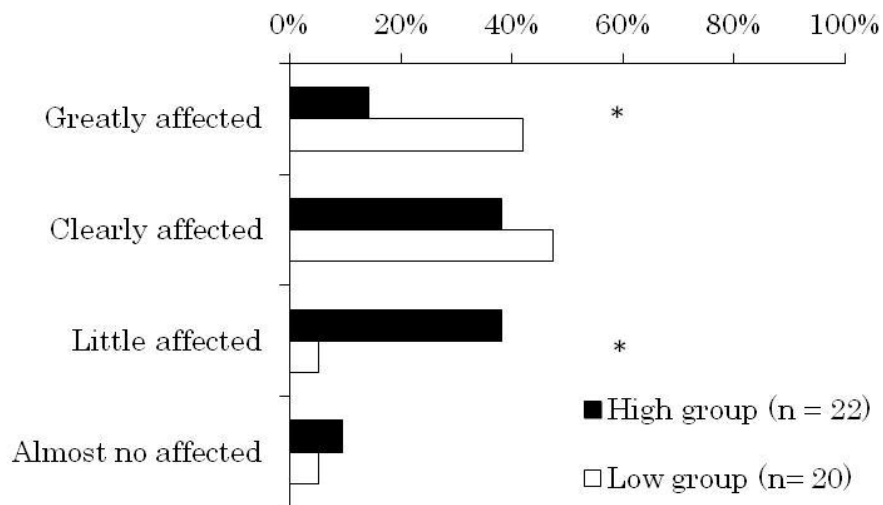


Figure 11 Comparison of influence of muscle soreness on daily life between subgroups according to training volume.

* significant difference between subgroups ($p < 0.05$).

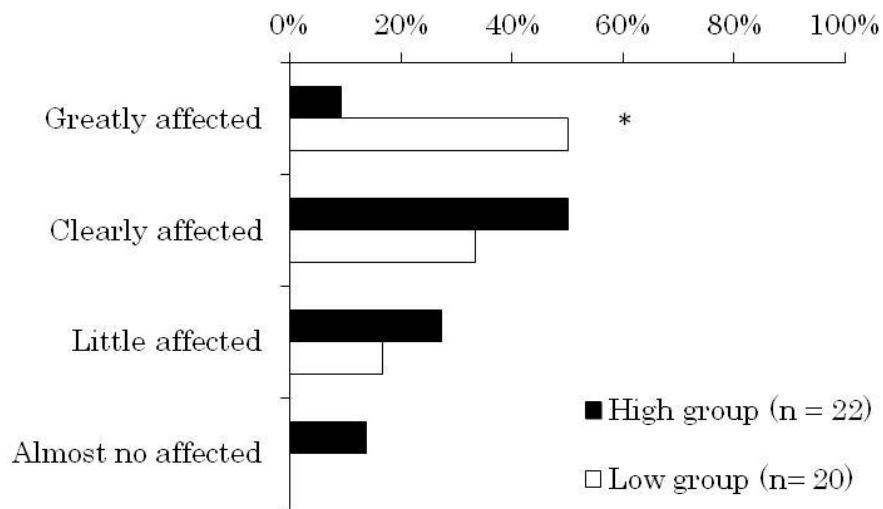


Figure 12 Comparison of influence of muscle soreness on daily life between subgroups according to longest training session.

* significant difference between subgroups (p < 0.05).

4) 考察

文献研究で述べたとおり，多くの先行研究では，筋損傷を評価する指標として筋痛に加え，MVIC トルクおよび CK を用いている．このうち，MVIC トルクや CK の測定については，対象者に対して最大努力あるいは侵襲的な負荷を与える上，時間的拘束が不可欠なため 1 つのレースにおいて大人数を対象として測定することが困難である．そこで本研究課題では，筋痛を筋損傷の評価指標として，様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有する 42 名のランナーを対象にマラソンレース後の筋損傷に影響を与える因子について検討した．その結果，レース前のトレーニング量が少ないランナーでマラソンレース後の筋痛が著しいことが明らかとなった．以下，1) マラソンレース後の筋痛の個人差，2) マラソンレース後の筋痛の部位差，3) マラソンレース後の筋痛の男女差についてそれぞれ考察する．

A. マラソンレース後の筋痛の個人差

筋痛は運動強度 (Tiidus and Ianuzzo, 1983) やトレーニング状況 (Schwane et al., 1987)

の影響を受けることが知られている。Schwane et al. (1987) の報告によると、DHR 後の筋痛は、事前に 2 週間の DHR トレーニングを行うことで軽減できる。これは、事前に運動を行った場合、次に同様の運動をした際の筋損傷が軽減されるという繰り返し効果によるものである (McHugh et al., 1999)。また、運動強度の観点から筋痛を検討した Tiidus and Ianuzzo (1983) は、低強度に比べて高強度の運動後の筋痛が著しいことを報告している。

本研究課題では、レースパフォーマンスを絶対的と相対的な側面から定量し、それぞれ上位群と下位群にわけて検討を行った。その結果、レースペース、目標ペースに対するレースペースの達成率の高低は、筋痛の曲線下面積や筋痛が日常生活に与えた影響との関連を認めなかった。つまり、本研究課題において、レースパフォーマンスの高低はレース後の筋痛に影響を及ぼさなかった。Noakes and Carter (1982) は、経験豊富なランナー 18 名と初心者ランナー 5 名を対象として、56 km ウルト라마ラソンレース前後に筋損傷指標として CK を測定し、各群の変化を比較している。その結果、レースペースは初心者ランナーで有意に低かったものの、レース後の CK は初心者ランナーで有意に高かった。この知見は、レースパフォーマンスよりもトレーニング状況が CK に著しい影響を与えていたことを示している。これに加えて本研究課題の結果は、筋痛においてもレースパフォーマンスよりもトレーニング状況の影響を受ける可能性が高いことを示している。

Polak et al. (1993) は、マラソンレースを 3 時間未満で完走した経験を有する 66 名のランナーを対象として、マラソンレース後の筋痛を調査している（なお、この研究では、レース直後の静脈内輸液の有無が回復に影響を与えるのかを検討するために介入を行ったが、静脈内輸液を行った群とプラセボ群で有意差がなかったことから、レースパフォーマンスの観点から検討している）。その結果、レースを 2 時間 55 分未満で完走したランナーは、2 時間 55 分以上で完走したランナーに比べて筋痛が著しかったことを報告している。この結果は、マラソンレースではレースパフォーマンスが筋痛に影響を与えることを示し

ており、本研究課題の結果とは異なるものである。本研究課題と Polak et al. (1993) の結果の相違は、絶対的パフォーマンスの違いにより説明できるかもしれない。すなわち、Polak et al. (1993) の対象者は全員がマラソンレースを 3 時間未満で完走した経験を有していたのに対し、本研究課題の対象者の大半は Novice runner であり、両者のレースペースは著しく異なっていた。実際、本研究課題の対象者のうち、マラソンレースを 3 時間未満で完走した者はわずか 5 名であった。したがって、3 時間未満の Fast runner を対象にした場合、マラソンレース後の筋痛はレースパフォーマンスの影響を強く受ける可能性が考えられる。また、Polak et al. (1993) の報告における平均走行距離は 80 km/週（範囲：35–165 km/週）であり、本研究課題の対象者に比べるとトレーニング量が著しく多かった。したがって、Trained runner のみを対象とした場合では、レースパフォーマンスの影響を受ける可能性も考えられる。

B. マラソンレース後の筋痛の部位差

本研究課題における筋痛のピーク値は大腿前部で高く、レース前との有意差が消失するまでの期間も大腿前部が最も長かった。この結果は、Novice runner を対象として、マラソンレース後の筋損傷を MVIC トルク、CK および筋痛によって定量し、筋損傷は膝関節伸展筋群で最も著しいことを明らかにした研究課題 2 の結果を支持するものである。一方、大腿前部の筋痛であっても、レース 6 日後にはレース前との有意差は消失した。この結果は、マラソンレース後の筋痛は 1 週間以内に回復することを示している。実際、マラソンレース後の筋痛の回復過程を検討した全ての研究は、1 週間以内にレース前と同等レベルになることを認めている (Kyröläinen et al., 2000; Liang et al., 2001; Sherman et al., 1984; Tojima et al., 2016)。以上を踏まえると、市民ランナーのマラソンレース後の筋痛は大腿前部で最も著しいものの、1 週間以内には回復すると考えられる。

C. マラソンレース後の筋痛の男女差

本研究課題では、トレーニング状況およびレースパフォーマンスの観点に加え、男女間における筋痛の曲線下面積の比較も行った。その結果、筋痛の曲線下面積は男女間での有意な差がなかった。筋痛に性差が与える影響を検討した先行研究をみると、男性で著しいという報告 (Dannecker et al., 2003, 2012), 女性で著しいという報告 (Oosthuyse and Bosch, 2017), 男女間での差がないという報告 (Rinard et al., 2000) が存在し、一致した見解は得られていない。Rinard et al. (2000) は、研究間における結果の不一致の主な原因として、多くの先行研究におけるサンプルサイズが 10 名程度と少ないことが関係している」と指摘し、十分なサンプルサイズ（男性：82 名，女性：83 名）を用いた上で、伸張性収縮運動後における筋痛を検討した結果、1 日後から 7 日後までの筋痛には男女間での有意な差がなかったことを報告している。本研究課題では、Rinard et al. (2000) のサンプルサイズに比べると少ないものの、比較的大きなサンプルサイズ（男性：24 名，女性：18 名）を用いた上でマラソンレース後の筋痛を検討した結果、筋痛の曲線下面積には男女差が認められなかった。著者の知る限り、マラソンレース後の筋痛に性差が与える影響を検討した先行研究はない。したがって、マラソンレース後の筋痛に性差が与える影響については、さらなる検討が必要である。

5) まとめ

本研究課題より、学生市民ランナーにおけるマラソンレース後の筋痛は、レースパフォーマンスよりもトレーニング状況の影響を受けることが明らかとなった。

VIII. 研究課題 5

マラソンシーズン中のトレーニングやレースによる負荷と生理学的指標、パフォーマンス指標との関係

1) 目的

これまでの研究課題によって、マラソンレース 1 週間後には筋損傷が消失し、生理学的指標およびパフォーマンス指標も回復することが明らかとなった。その一方で、これまでの研究課題は、ある 1 回のレース後の回復を検討したのみであり、短期間に高頻度でレースに出場したランナーを対象とした際の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復については明らかにしていない。近年の市民ランナーの中にはマラソンシーズンにおいて、毎週あるいは隔週の頻度で複数回にわたりレースに出場する者がいる。高頻度でのレース出場は、不十分な回復を招きオーバーリーチングを誘発する可能性がある。したがって、短期間に高頻度でレースに出場するランナーを対象として、マラソンシーズン中のトレーニングおよびレースによる負荷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を検討することは、ランニングの実践現場に示唆を与える資料となる。

以上を踏まえ研究課題 5 では、市民ランナーを対象としてマラソンシーズン中のトレーニングおよびレースと生理学的指標およびパフォーマンス指標との関係を事例的に検討した。研究課題 5 では、70 回以上のレース出場経験を有するランナー（研究課題 5—1）、8 週間に 4 回のマラソンレースに出場した **Fast runner**（研究課題 5—2）を対象としてそれぞれ実験を行った。

研究課題 5—1

2) 方法

A. 対象者

対象者は、男性ランナー1名（年齢：34歳，身長：180 cm，体重：78 kg）であった．対象者のランニング歴は3年であったが，過去にハーフマラソンレース5回，マラソンレース11回，ハーフマラソンとフルマラソン以外のロードレース22回，ウルトラマラソンレース18回，トレイルランニングレース19回の出場経験を有していた．対象者の自己記録はハーフマラソンが1時間15分38秒，マラソンが2時間41分50秒，100 km ウルトラマラソンが9時間55分41秒，24時間走ウルトラマラソンが204.125 km であった．また，東京都から新潟県までを走破する日本横断「川の道」フットレース（520 km）の完走経験が2回（うち1回は優勝）あった．

B. 実験デザイン

研究課題5-1では，対象者が2015年11月に出場した日本陸上競技連盟公認のマラソンレースである第28回大田原マラソン（2時間53分35秒で完走）の7日前（1週間前）と7日後（1週間後）にトレッドミルテストを行った．また，マラソンレースの7日前，1日前および1-7日後の筋痛を評価した．なお，マラソンレースのスタート時の気象条件は，気温が10.8℃，風速が3.3 m/sであった．さらに，マラソンレースの6週間前から2週間後までのトレーニング状況およびレースの出場状況についても定量した．

C. 実験内容

C-1. トレッドミルテスト

トレッドミルテストは研究課題3と同一のプロトコールで行った．この際，最大下固定負荷試験の走速度は13 km/hとした．また，最大漸増負荷試験におけるVTは， $\dot{V}O_2$ に対する $\dot{V}CO_2$ の屈曲点をV-slope法により算出した（Beaver et al., 1986）．同様に，呼吸性代償閾値（Respiratory compensation point: RCP）を \dot{V}_E に対する $\dot{V}CO_2$ の屈曲点から算出した．

C-2. 筋痛

筋痛の評価は研究課題 3 と同様の方法によって、レースの 7 日前、1 日前および 1-7 日後に行われた。

C-3. トレーニングおよびレースの出場状況

マラソンレースの 6 週間前から 2 週間後までのトレーニングおよびレースの出場状況を定量した。対象者は GPS 付き腕時計 (AMBIT2, Suunto 社製) を装着した状態で普段のランニングトレーニングを行っており、記録されたデータをもとに週毎にトレーニング分析を行った。なお、ランニングのトレーニングおよびレースについては、Binary model (zone1: vVT 未満, zone2: vVT 以上) をもとに強度分けを行った。

3) 結果

A. トレッドミルテスト

Table 17 は、マラソンレース 1 週間前および 1 週間後のトレッドミルテストの結果を示したものである。生理学的指標の変化率は、最大下固定負荷試験の $\text{O}_2 \text{ Cost}$ が -2.5% , $\%\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max at VT}$ が -2.7% , $\%\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max at RCP}$ が -4.3% , $\dot{\text{V}}\text{O}_2\text{max}$ が 2.0% であった。パフォーマンス指標の変化率は、vVT が 4.5% , vRCP が 0.0% , Vmax が 0.0% であった。

Table 17 Results of the treadmill running test before and 7 days after marathon running.

	Pre	7 d after	%change
O ₂ cost (ml/kg/km)	199.4	194.3	−2.5
% $\dot{V}O_{2\max}$ at VT (%)	73.5	71.5	−2.7
% $\dot{V}O_{2\max}$ at RCP (%)	94.8	90.7	−4.3
$\dot{V}O_{2\max}$ (ml/kg/min)	59.7	60.9	2.0
vVT (km/h)	13.2	13.8	4.5
vRCP (km/h)	17.4	17.4	0.0
V _{max} (km/h)	19.2	19.2	0.0

% $\dot{V}O_{2\max}$, percent utilization of maximal oxygen consumption; VT, ventilatory threshold; RCP, respiratory compensation point; $\dot{V}O_{2\max}$ = maximal oxygen consumption; vVT, velocity at VT; vRCP, velocity at RCP; V_{max}, maxmail velocity.

B. 筋痛

Figure 13 は、マラソンレース前後の筋痛の経日変化を示したものである。筋痛は主として下肢筋群で発生していた。筋痛はレースの 1 日後に最も高く、7 日後にはレース前と同等レベルにまで低下していた。

C. トレーニングおよびレース出場状況

Figure 14 は、マラソンレースの 6 週間前から 2 週間後にかけてのトレーニング状況を示したものである。なお、この分析には対象者が出場したレースのデータを含めている。週当たりの平均トレーニング時間は 9.7 時間であった。対象者は、レースを除いたほとんどのトレーニングを vVT 未満の強度 (zone1) で行っていた。また、クロストレーニング (自転車運動) も時々実施していた。

対象者は、マラソンレースの 13 日後に 20 km レースに出場し、1 時間 15 分 32 秒で完走していた。

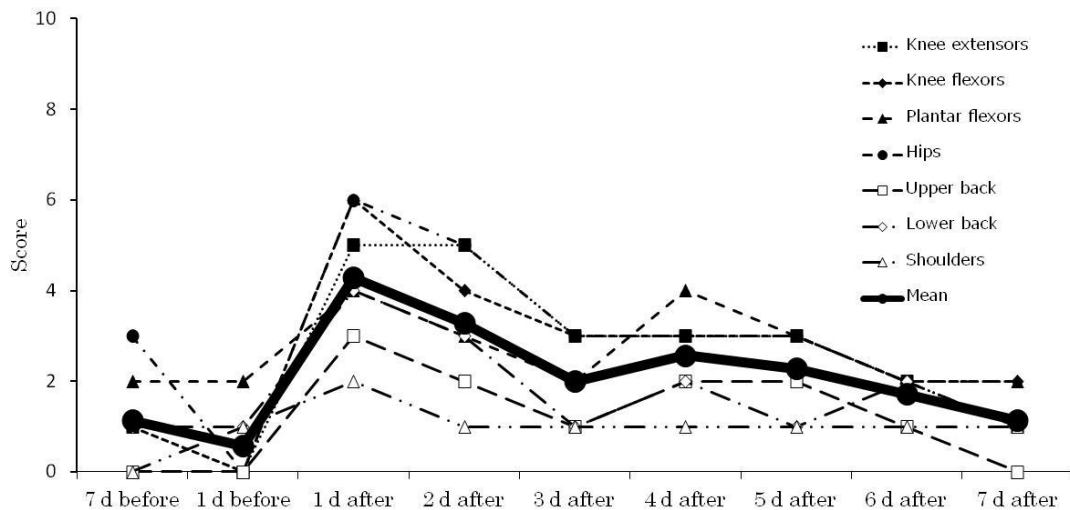


Figure 13 Muscle soreness before and up to the 7 days after marathon running.

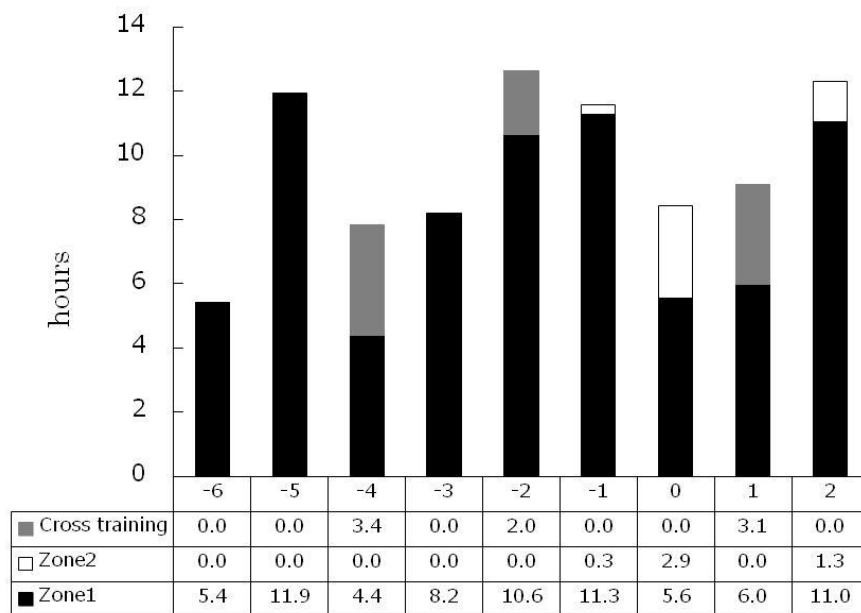


Figure 14 Weekly training hours in zone 1, zone 2, and cross training.

The data include a marathon race at week 0 and a 20-km race at week 2. Running training intensity is divided into 2 zones: zone 1, below ventilatory threshold, and zone 2, above ventilatory threshold.

4) 考察

研究課題 5—1 では、レース経験が豊富なランナーを対象として、マラソンレースの 1 週間前および 1 週間後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の変化ならびにレース後のトレーニング状況を検討した。

本研究課題のような事例研究においては、統計学的手法をもとに回復を検討することが

困難のため、測定指標の再現性を検討した先行研究の結果と比較することで回復を評価する必要がある。トレーニングされたランナーを対象としてトレッドミルテストの再現性を検討した先行研究によると、日間の個人内の変動係数は指標により多少異なるが概ね 5% 前後である (Lourenço et al., 2011)。一方、対象者における生理学的指標およびパフォーマンス指標の変化率は、-4.3%から 4.5%の範囲であった。したがって、研究課題 5—1 におけるマラソンレース 1 週間後のトレッドミルテストの結果は、対象者の生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復していたことを示唆している。

Billat et al. (2012) は、Trained runner のマラソンレース中の相対的強度が $73.8 \pm 8.8\%V_{max}$ であったことを報告している。また、研究課題 3 における 11 名のマラソンレース中の相対的強度は $70.3 \pm 6.0\%V_{max}$ であった。これに対し、本研究課題におけるマラソンレースの相対的強度は $76.0\%V_{max}$ であり、対象者のマラソンレースでの相対的パフォーマンスは高いものであった。逸話的な話では、マラソンレース後、身体機能が回復するためには長期間が必要であると認識されている (Armstrong et al., 2015)。しかし、対象者はマラソンレースの 2 週間後にマラソンレースよりも高強度で 20 km レースを完走していた (マラソンレース : 14.6 km/h, 20 km レース : 15.9 km/h)。この結果は、対象者が少なくとも 2 週間後には長時間にわたり高い強度を維持する能力が完全に回復していたことを示すものである。

対象者のマラソンレースの 6 週間前から 2 週間後のトレーニング状況をみると、レースを除いた場合、ほとんどのランニングを低強度 (vVT 未満) で実施していた。低強度のトレーニング量を確保することはオーバーリーチングを防ぐために重要な役割を持つことが示唆されている (Seiler et al., 2007)。また、CK の増加は、中強度以上のトレーニング量と関係があることが指摘されている (Petibois et al., 2002)。実際、高頻度でレースに出場していた持久性アスリートを対象として、低強度のトレーニングの重要性を示唆した事例報告はいくつか存在する (Metcalf et al., 2017; Mujika, 2014)。プロ自転車競技

選手 4 名を対象として 1 年間にわたるトレーニング強度の分布を検討した報告によると、レース期ではレースのない週のトレーニングの量と強度を減らすことで回復を図っていた (Metcalfe et al., 2017)。また、対象者は、筋痛があるときにはクロストレーニングを実施していた。これは、筋痛がありランニングの実施が困難と感じられるときでもエアロバイクを用いた自転車運動を行うことで回復が早まる、と対象者自身が普段から感じていたことによる。筋痛が著しいときにランニングを実施する場合、ランニングフォームが変化するため (Chen et al., 2007b)、傷害の危険性が増加する可能性がある。一方、自転車運動は着地衝撃がないため、レース後にも傷害の危険性が少なく実施しやすいと考えられる。以上を踏まえると、マラソンレース 1 週間後に生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復し、2 週間後には 20 km レースを高い強度で完走できた要因として、レース間のトレーニング強度を落としたり、バイクトレーニングを用いるといったトレーニングの特徴が関係していた可能性がある。

5) まとめ

レース経験が豊富なランナーにおけるマラソンレースの 1 週間前と 1 週間後の生理学的指標およびパフォーマンス指標は同等であり、2 週間後の 20 km レースでは高強度で走行していた。対象者はレースを除いたほとんどのトレーニングを低強度で実施していた。

IV. 研究課題 5—2

2) 方法

A. 対象者

対象者は、大学院に在学する男性ランナー 1 名（年齢：24 歳，身長：181 cm，体重：68 kg，ランニング経験：11 年，マラソン出場回数：2 回）であった。対象者は、大学 4 年まで中長距離選手として陸上競技部に所属しており、大学院進学後は市民ランナーとしてラ

ンニングを継続していた。陸上競技部在籍時の対象者の自己記録は、800 m が 1 分 53 秒，1500 m が 3 分 51 秒，5000 m が 14 分 55 秒，10000 m が 31 分 05 秒であった。ハーフマラソンとマラソンについては，陸上競技部在籍時には出場経験がなかった。実験開始前における対象者の自己記録は，ハーフマラソンが 1 時間 9 分 57 秒，マラソンが 2 時間 38 分 59 秒であった。また，日本陸上競技選手権大会男子マラソンの出場・完走経験があった。

B. 実験デザイン

研究課題 5—2 では，2016 年 8 月から 12 月までの 16 週間を実験対象期間とした (Figure 15)。対象期間を通してトレーニングやレースによる負荷 (Training load)，主観的体調を定量した。対象者は，6—14 週の 8 週間で 4 回マラソンレースに出場した (6 週目，8 週目，12 週目および 14 週目)。トレッドミルテストは 5 週目 (1 回目のマラソンレースの 9 日前)，11 週目 (3 回目のマラソンレースの 7 日前)，13 週目 (3 回目のマラソンレースの 7 日後) および 16 週目 (4 回目のマラソンレースの 10 日後) に実施した。なお，対象者はいずれのマラソンレースもその時点での最善を尽くすことを心がけていた。

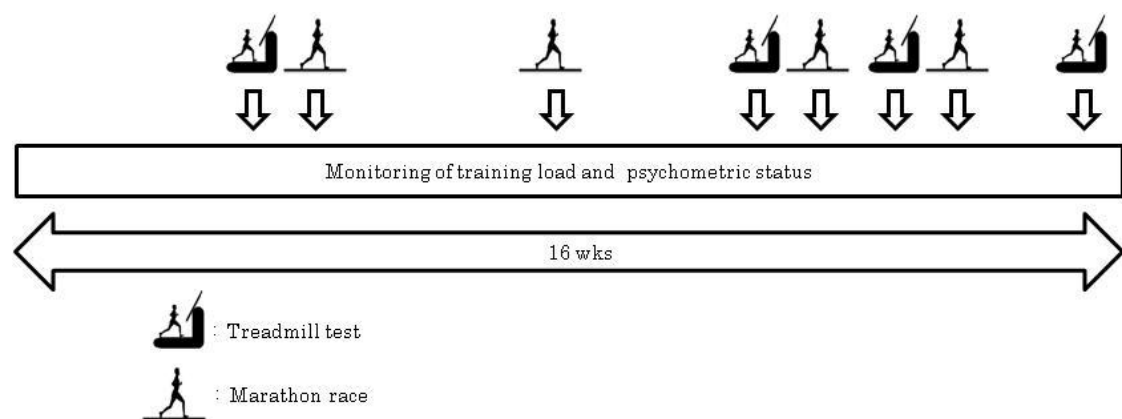


Figure 15 Experimental design.

C. 実験内容

C-1. トレッドミルテスト

研究課題 5-1 と同一のプロトコールおよび分析方法でトレッドミルテストを実施した。ただし、最大下固定負荷試験の走速度は 13.5 km/h とした。

C-2. Training load

対象者は、トレーニングおよびレース時に心拍計（M400 HR, Polar 社製）を装着しランニングを実施した。研究課題 5-2 では、トレッドミルテストの最大漸増負荷試験における VT および RCP 時の HR をもとに Training load の強度分けを行った（zone1: VT 未満の HR, zone2: VT 以上 RCP 未満の HR, zone3: RCP 以上の HR）(Lucía et al., 2000)。なお、よくトレーニングされた持久性選手を対象とした場合、VT および RCP 時の HR は年間を通して一定のため（Lucía et al., 2000）、1 回目のトレッドミルテストにおける VT および RCP 時の HR をもとに強度分けを行った（zone1: 171 beats/min 未満, zone2: 171-182 beats/min, zone3: 183 beats/min 以上）。Training load は、Time in zone 法をもとに算出した（Sylta et al., 2014）。すなわち、各トレーニングあるいはレースの運動時間（分）を zone 毎に分類し、それぞれに係数（zone1: 1, zone2: 2, zone3: 3）を乗算した。

Training load は、全ての zone の合計値とした。また、強度毎にランニング時間を算出し、合計のランニング時間に対する割合を算出した。

C-3. 主観的体調

主観的体調を Hooper の質問紙によって調査した (Hooper et al., 1995)。Hooper の質問紙は、1) 睡眠、2) ストレス、3) 疲労、4) 筋痛の 4 項目について 7 段階の尺度をもとに回答した。また、4 つの項目の合計値 (Hooper's score: 数値が高いほど体調が悪いと評価される) を算出した。対象者は、毎日の起床後に Hooper の質問紙に回答した。

D. データおよび統計処理

数値は、平均値±標準偏差ならびに変動係数 (標準偏差÷平均値×100) で表された。統計処理には統計処理ソフト (IBM SPSS Statistics 22, SPSS Japan 社製) を用いた。Training load および主観的体調に関する指標は、週毎に分析された。また、16 週間のうち、1-5 週を準備期 (Phase 1)、6-14 週をレース期 (Phase 2)、15-16 週を回復期 (Phase 3) として各期の強度分布を分析した。なお、レース期においてはマラソンレースを含んだ分析と含まない分析を行った。日毎の Training load と翌日の主観的体調の各変数との相関関係を Pearson の相関係数を用いて比較した (Buchheit et al., 2013)。この際、マラソンレースの日を除外した Training load と主観的体調との相関関係も検討した。Pearson の相関係数は、Hopkins et al. (2009) をもとに、trivial (< 0.1), small (0.1-0.29), moderate (0.3-0.49), large (0.5-0.69), very large (0.7-0.89) および almost perfect (0.9-1.0) の効果量と解釈した。

3) 結果

対象者は、全てのマラソンレースを完走した (6 週目: 2 時間 38 分, 8 週目: 2 時間 47

分, 12 週目 : 2 時間 36 分, 14 週目 ; 2 時間 44 分).

A. トレッドミルテスト

Table 18 は, トレッドミルテストの結果を示したものである. パフォーマンス指標である V_{\max} は, 1 回目の測定で 20.6 km/h と最も低く, 以降は 20.8 - 21.0 km/h の範囲であった. 4 回の測定をとおした V_{\max} の CV は 1.0%であった. 生理学的指標の CV は, 2.9-4.6%の範囲であった.

Table 18 Results of the treadmill running test.

	1st	2nd	3rd	4th	Mean \pm SD (CV)
O ₂ Cost (ml/kg/km)	194.2	202.2	199.6	208.0	201.0 \pm 5.7 (2.9)
% $\dot{V}O_{2\max}$ at VT (%)	72.0	79.0	74.5	72.9	74.6 \pm 3.1 (4.2)
% $\dot{V}O_{2\max}$ at RCP (%)	85.3	94.1	91.8	92.7	90.9 \pm 3.9 (4.3)
$\dot{V}O_{2\max}$ (ml/kg/min)	67.8	69.6	69.1	75.2	70.4 \pm 3.3 (4.6)
vVT (km/h)	15.6	17.4	16.2	15.6	16.2 \pm 0.8 (5.2)
vRCP (km/h)	18.0	19.8	19.2	19.2	19.2 \pm 0.5 (2.6)
V_{\max} (km/h)	20.6	21.0	20.8	21.0	20.8 \pm 0.2 (1.0)

% $\dot{V}O_{2\max}$, percent utilization of maximal oxygen consumption; VT, ventilatory threshold; RCP, respiratory compensation point; $\dot{V}O_{2\max}$ = maximal oxygen consumption; vVT, velocity at VT; vRCP, velocity at RCP; V_{\max} , maxmail velocity; CV, coefficient of variation.

B. Training load

実験期間中の週当たりのランニング時間と Training load は, 277 \pm 130 分 (CV: 46.9%), 381 \pm 179 Arbitrary unit (A.U.) (CV: 46.9%) であった (Figure 16). 強度分布は, zone1 が 73 \pm 16% (CV: 22.6%), zone2 が 14 \pm 15% (CV: 108.2%), zone3 が 13 \pm 11% (CV: 83.0%) であった. Figure 17 は, 各期の強度分布を相対値 (%) および絶対値 (分) で示したものである. Phase 1 は, zone1 が 79% (238 分), zone2 が 11% (32 分), zone3 が 10% (27 分) であった. Phase 2 は, マラソンレースを含んだ場合, zone1 が 70% (213 分), zone2 が 18% (57 分), zone3 が 12% (36 分) であった. 一方,

マラソンレースを除いた場合の Phase 2 は, zone1 が 89% (206 分), zone2 が 4% (9 分), zone3 が 7% (18 分) であった. Phase 3 は, zone1 が 72% (76 分), zone2 が 4% (5 分), zone3 が 24% (19 分) であった. なお, 実験期間中の週当たりの走行距離は 59 ± 27 km であった.

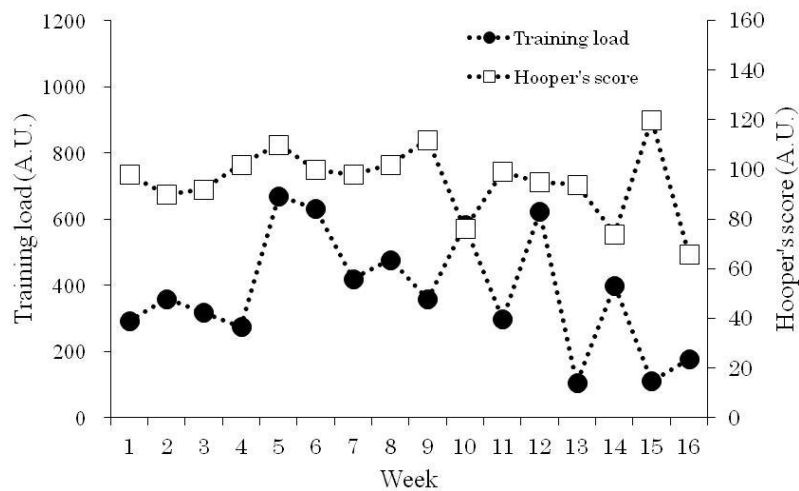


Figure 16 Weekly basis analyses of training load and Hooper's score.

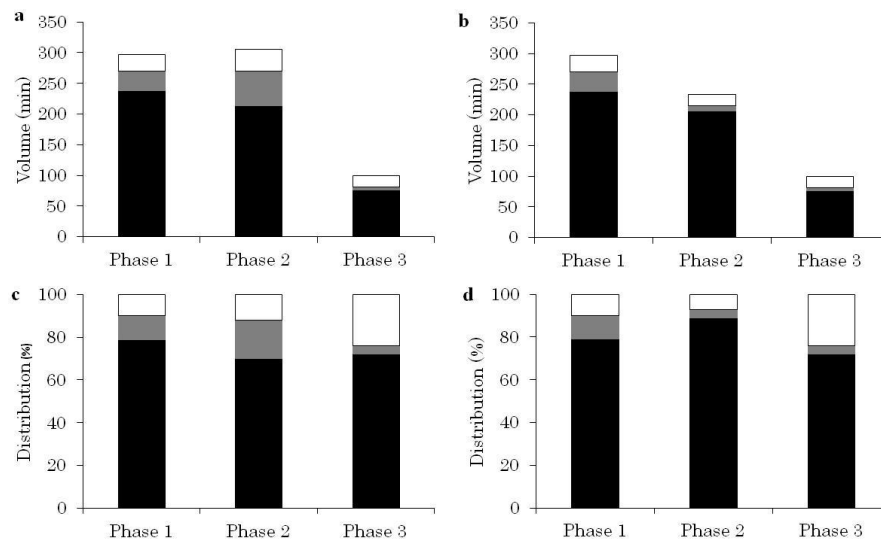


Figure 17 Weekly absolute (a, b) and relative (c, d) running duration. a and c include marathon race. b and d exclude marathon race.

C. 主観的体調

実験期間中の週当たりの睡眠は 25.6 ± 3.9 A.U. (CV: 15.3%), ストレスは 24.3 ± 4.3 A.U. (CV: 17.8%), 疲労は 27.0 ± 5.0 A.U. (CV: 18.6%), 筋痛は 18.6 ± 6.3 A.U. (CV: 33.7%) であった。また, Hooper's score は 95.5 ± 14.1 A.U. (CV: 14.7%) であった。

D. Training load と主観的体調との関係

Figure 18 には Training load と Hooper's score との相関関係を示した。マラソンレースの日を含んだ場合, 日毎の Training load と睡眠との間には有意な相関関係が認められなかった ($r = -.003, p = .971$)。一方, Training load とストレス ($r = .207, p = .030$), 疲労 ($r = .540, p < .001$), 筋痛 ($r = .448, p < .001$) および Hooper's score ($r = .446, p < .001$) との間にはそれぞれ有意な相関関係が認められた。

マラソンレースの日を除外した場合, 日毎の Training load と睡眠 ($r = -.056, p = .570$) およびストレス ($r = .124, p = .206$) との間には有意な相関関係が認められなかった。一方, Training load と疲労 ($r = .473, p < .001$), 筋痛 ($r = .210, p = .031$) および Hooper's score ($r = .282, p = .003$) との間にはそれぞれ有意な相関関係が認められた。

相関係数の効果量は, 疲労, 筋痛および Hooper's score でマラソンレースを含んだ場合と除外した場合で差が認められた。すなわち, レースを含んだ場合, Training load と疲労との間には large の相関関係が認められたものの, レースを除外した場合には両者の関係は moderate となった。また, Training load と筋痛および Hooper's score との相関関係についてもレースを含んだ場合には moderate の相関関係が認められたものの, レースを除外した場合にはそれぞれ small となった。

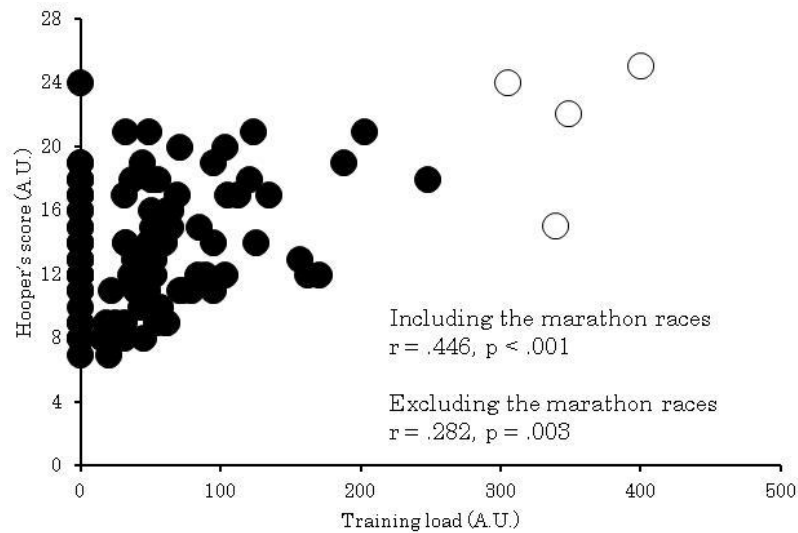


Figure 18 Relationship between daily training load and Hooper's score.
The training load of the marathon races is indicated by open circle.

E. 各マラソンレースの1日後から7日後までの Training load と主観的体調

Table 19 には、各マラソンレースから1週間以内の Training load と主観的体調を示した。なお、実験期間中の1日当たりの平均値 (Training load: 54.4 A.U., 睡眠: 3.7 A.U., ストレス: 3.5 A.U., 疲労: 3.9 A.U., 筋痛: 2.7 A.U., Hooper's score : 13.9 A.U.) よりも高かった場合、背景を薄墨色で示した。

Table 19 Training load and psychometric status for seven days after each marathon race.

		1 days	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days
Marathon race1	Training load (A.U.)	0	0	85	49	84	15	188
	Sleep (A.U.)	4	2	2	5	3	5	2
	Stress (A.U.)	5	4	3	3	2	2	2
	Fatigue (A.U.)	6	5	3	4	5	3	2
	Muscle soreness (A.U.)	7	6	4	3	2	2	2
	Hooper's score (A.U.)	22	17	12	15	12	12	8
Marathon race2	Training load (A.U.)	0	0	49	61	0	248	0
	Sleep (A.U.)	1	4	5	7	2	6	4
	Stress (A.U.)	3	3	5	6	2	5	5
	Fatigue (A.U.)	6	5	6	6	4	4	7
	Muscle soreness (A.U.)	5	3	2	2	1	1	2
	Hooper's score (A.U.)	15	15	18	21	9	16	18
Marathon race3	Training load (A.U.)	0	0	0	0	32	31	42
	Sleep (A.U.)	6	2	1	5	2	6	3
	Stress (A.U.)	5	4	3	3	2	3	2
	Fatigue (A.U.)	7	5	3	2	2	3	2
	Muscle soreness (A.U.)	7	5	4	2	2	2	1
	Hooper's score (A.U.)	25	16	11	12	8	14	8
Marathon race4	Training load (A.U.)	0	0	0	39	73	0	0
	Sleep (A.U.)	5	6	5	7	4	1	5
	Stress (A.U.)	5	6	6	5	3	3	3
	Fatigue (A.U.)	7	7	5	4	2	5	4
	Muscle soreness (A.U.)	7	5	3	2	2	2	1
	Hooper's score (A.U.)	24	24	19	18	11	11	13

The gray area indicates that the value is higher than 16-week average value (Training load: 54.4 A.U., Sleep: 3.7 A.U., Stress: 3.5 A.U., Fatigue: 3.9 A.U., Muscle soreness: 2.7 A.U., Hooper's score: 13.9 A.U.).

4) 考察

研究課題 5—2 では、8 週間の期間で 4 回のマラソンレースに出場した Fast runner を対象として、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復、Traininig load と主観的体調との関係を検討した。研究課題 5—2 における主な知見は、生理学的指標およびパフォーマンス指標の変動が小さいことであり、これは対象者がオーバーリーチングに陥ることなく、短期間に 4 回のマラソンレースに出場していたことを示している。

Saunders et al. (2010) は、研究課題 5—2 の対象者よりもパフォーマンス指標がやや劣るランナー 34 名 (Vmax の平均値 : 19.0 km/h) を対象として、17 週間で 4 回のトレッドミルテストを行い、パフォーマンス指標の変化を検討した結果、被験者内の Vmax の変動は 2.5%であったと報告した。一方、対象者における Vmax の CV は 1.0%であり、Saunders et al. (2010) の報告に比べ変動は小さく、パフォーマンス指標が安定していた。また、生理学的指標に関しても CV は 1.8—5.2%の範囲であり、これは先行研究と比べても同等あるいは低い数値である (Lourenço et al., 2011)。これまでの研究課題において、ランナーがマラソンレースを走ると、1 週間後には生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復することを明らかにした。それに加え、研究課題 5—2 の結果より、一例の事例研究ではあるものの、短期間に高頻度でレースに出場した場合においても、およそ 1 週間後には生理学的指標およびパフォーマンス指標が回復していたことが示された。

サッカー、ラグビー、バスケットボールといった混戦型球技の試合期では、選手は 1 週間に 2—3 回の頻度で試合に出場することがある。混戦型球技では、マラソンと同様に試合後数日にわたり筋グリコーゲンの減少 (Krustrup et al., 2011)、最大筋力の低下および CK の増加 (Nedelec et al., 2014) が認められる。このような背景もあり、混戦型球技選手の回復に関する研究は発展しており (Twist and Highton, 2013)、Training load と主観的体調およびパフォーマンスとの関係を検討した報告は多い (Buchheit et al., 2013; Coutts et al., 2007a; Faude et al., 2011; Moalla et al., 2016; Nunes et al., 2014)。

Buchheit et al. (2013) は、オーストラリアンフットボール選手を対象として、鍛錬期における日毎の Training load と主観的体調、最大下運動時の HR、運動後の心拍変動および唾液コルチゾールとの関係を検討した。その結果、Training load と主観的体調および運動中・後の心拍応答との間に有意な相関関係があることを明らかにした。この結果に基づき彼らは、Training load、運動時の HR に加え主観的体調を定量することがトレーニングの応答を管理するための最も簡便な手段であると結論づけた。本研究課題におけるマラソンレースの日を含んだ Training load とストレス、疲労、筋痛および Hooper's score との間には有意な相関関係が認められたことから、Hooper の質問紙は市民ランナーの日々の Training load を反映する指標であることが示された。一方、Training load と睡眠の間にはマラソンレースを含んだ場合、除外した場合のいずれも有意な相関関係が認められなかった。睡眠は、カフェインやアルコールの摂取、電子機器の利用といった Training load 以外の要因の影響を受けることが指摘されている (Nédélec et al., 2015)。実際、Moalla et al. (2016) の報告によると、プロサッカー選手を対象として、16 週間の Training load と Hooper の質問紙による主観的体調との相関関係を検討した結果、4 項目の相関係数は睡眠で最も低かった（睡眠： $r = .23$ 、ストレス： $r = .30$ 、疲労： $r = .48$ 、筋痛： $r = .48$ ）。したがって、本研究課題の対象者においても Training load 以外の要因が睡眠に影響を与えていたと考えられる。睡眠はグリコーゲンの再合成、筋損傷、傷害のリスクと関係し、アスリートの回復と密接な関係があることが指摘されており (Nédélec et al., 2015)、エリートトライアスロン選手を対象とした事例研究によると、オーバーリーチングになった選手は、Hooper の質問紙による睡眠の週当たりの数値が徐々に悪化していたことが報告されている (Plews et al., 2012)。以上を踏まえると、オーバーリーチングを防ぎながらパフォーマンスを最適化させるためには、Training load 以外の要因を含め負荷と回復とのバランスを整えることが必要不可欠である。特に市民ランナーにおいては、簡便な方法によって回復状況を評価できれば実用性が高いため、Training load と Hooper の質問紙による

主観的体調を同時に定量することは、市民ランナーのパフォーマンスを最適化する上で価値のある取り組みであると考えられる。また、先行研究の知見を踏まえると、主観的体調は日毎の数値だけではなく、週当たりの数値も踏まえた上で評価していく必要がある。

Training load と疲労、筋痛および Hooper's score との相関係数の効果量は、マラソンレースの日を除外した場合に小さくなった (Figure 18)。この結果は、Training load と主観的体調との関係は比例関係ではなく、Training load が著しく増加した際に主観的体調の数値が顕著に高まり、体調が悪化していたことを表している。また、マラソンレースから 1 週間以内は、Training load が低い傾向にあったのにも関わらず、主観的体調は悪い傾向にあった (Table 19)。この結果は、Training load が著しく高かったマラソンレースでは、数日間にわたり主観的体調に影響を与えていたことを示唆している。なお、本研究の対象者はレース期におけるレース以外のトレーニングの量と強度が低かった。したがって、ランナーのトレーニングの特徴によっては、マラソンレースを除外した場合でも Training load と主観的体調との間には高い相関関係が認められると考えられる。

Pinot and Grappe (2015) は、ワールドクラスの自転車競技選手 1 名を対象として 6 年間にわたる Training load (セッション RPE 法によって定量) とパフォーマンスを検討している。その結果、この選手はパフォーマンスの向上に伴い、Training load が増加していたと同時に、トレーニングの単調性 (Monotony) や緊張度 (Strain) の CV が大きくなっていたことから、トレーニングが動的になっていたことを報告した。また、高山ほか (2016a) は、国内トップレベルの女性トレイルランナー 1 名を対象として 16 週間の Training load (セッション RPE 法によって定量) を報告している。この研究で対象となったトレイルランナーは、16 週間の期間で 4 回のレース (100 km ウルト라마ラソン, 73 km トレイルレース, 37 km トレイルレース, 77 km トレイルレース) に出場しており、いずれも優れた記録を残していた (各レースの総合順位が 2 位, 2 位, 1 位, 1 位)。この女性トレイルランナーにおける Training load の CV は 71%であり、Pinot and Grappe

(2015) の事例と同様にトレーニングの量や強度の変動が大きい動的なトレーニングであった。本研究課題の対象者の **Training load** の CV は 46.9%と女性トレイルランナーの事例に比べて低い傾向にあったが、週間・日間ともにばらつきが著しかった。

16 週間における強度の分布をみると、低強度を示す **zone1** が 70%以上を占めていた。また、**zone2** (108.2%) と **zone3** (83.0%) に比べ **zone1** (22.6%) の CV が低かった。これらの結果は対象者が常に低強度のトレーニングを行っていたことを意味している。また、対象者は、**Phase 2** においてレース以外のほとんどのランニングを低強度で実施していた。このトレーニングの特徴は、研究課題 5—1 の対象者と類似していた。以上、先行研究と研究課題 5 に鑑みると、短期間に高頻度でレースに出場するランナーにおいては、**Training load** に大きな変動を持たせた上で、レース以外のトレーニング強度を落とすことによって **Training load** を減らす方法が適しているのかもしれない。また、対象者における生理学的指標およびパフォーマンス指標の変動が小さかった原因には、このようなトレーニングの特徴が関係していたのかもしれない。

5) まとめ

研究課題 5—2 では、8 週間で 4 回のマラソンレースに出場した **Fast runner** を対象として、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復、**Training load** と主観的体調との関係を検討した。その結果、対象者の生理学的指標およびパフォーマンス指標の変動は小さかった。また、**Hooper** の質問紙による主観的体調は、マラソンシーズン中の **Training load** や日常生活によるストレスを反映する指標である可能性が認められた。

IX. 総合考察

本章では、マラソンレースが筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響について、トレーニング状況やレースパフォーマンスといったランナーの特性の観点から検討することによって、マラソンレース後の回復に及ぼす個人差について言及する。また、本研究課題と先行研究の知見をもとに、レース後に必要な休養期間ならびにトレーニングの方針に関する現場への示唆を考察する。最後に、本研究の限界と今後の課題についても述べる。

1) マラソンレース後の筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンス指標とその個人差

マラソンレース中の HR は、約 80–90%HRmax にも達する (Billat et al., 2012)。また、長時間にわたり繰り返される着地衝撃によって筋損傷が起こる (Sanchez et al. 2006)。このように、マラソンは全身諸器官への負荷が著しい持久性競技である。筋力トレーニングや DHR によって引き起こされる筋損傷は、生理学的指標およびパフォーマンス指標を低下させるという文献研究の結果を踏まえ、本研究でははじめに、マラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響について検討した (研究課題 1・2)。その結果、マラソンレース後、筋損傷が生じている期間における生理学的指標およびパフォーマンス指標は低下し、筋損傷から回復した場合、その現象は認められなくなることが明らかとなった。800 人のランナーを対象とした調査報告によると、マラソンレース後に筋痛を感じた人は 80%にも達し、レース翌日の仕事、学校あるいは家事に支障が出た経験を有する人が 3 分の 1 以上いた (クロス・マーケティング, 2013)。したがって、マラソンレース後の筋損傷は、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復に関係するのみならず、日常生活にも影響を及ぼす要因となり得る。そこで研究課題 4 では、マラソンレース後の筋損傷の個人差を明らかにするために、様々なトレーニング状況および幅広いレースパフォーマンスを有するランナーを対象として、マラソンレース後の筋痛を検討

した。その結果、マラソンレース後の筋痛はトレーニング状況の影響を受けることが明らかとなり、トレーニング量の少ないランナーで著しかった。また、トレーニング量の多いランナーやレース前3ヶ月間のトレーニングにおいて、1回で走った最長距離が多いランナーは、レース後の筋痛が日常生活に与えた影響が軽微であった。レース前のトレーニング状況がマラソンレース中あるいはレース後の疲労や障害に関係することを報告した先行研究としては、Rasmussen et al. (2013) と森ほか (2014) の報告がある。Rasmussen et al. (2013) は、マラソンレース前の週間走行距離が30 km未満の対象者は、30 km以上のランナーに比べてレース後、ランニング障害にかかるリスクが高いことを報告している。また、森ほか (2014) は、市民ランナーを対象としてマラソンレース中の脚のきつさとトレーニング状況との関係を検討した結果、走行距離や最長距離が少ないランナーではレース後半に脚のきつさをより感じていたことを報告している。近年、マラソンレースに出場するランナーの中には、十分なトレーニングを積まずに走る者もいる。しかし、研究課題4と先行研究の知見を踏まえると、市民ランナーがマラソンレース中の脚筋疲労やレース後の筋痛を軽減するためにも、レース前のトレーニング量を確保することは重要である。研究課題4の結果をもとにすると学生市民ランナーの場合、1) レース前3ヶ月間で合計150km (月間走行距離50 km) 以上走る、2) 1回に26 km以上の距離を走る機会を設ける、という条件のうちどちらか一方あるいは両方を満たすことで著しい筋痛を防げると考えられる。一方、日常的に厳しいトレーニングを行っている市民ランナーの中には、マラソンレースによる筋損傷が軽微な場合もある。Karstoft et al. (2013) は、8名のレース経験が豊富なランナー (マラソン完走回数: 108回, 平均値) が1週間にわたり毎日マラソンレースに出場した際のレースパフォーマンスならびにレース前後の血液指標の変化を検討している。この研究における完走時間は、7日目で最も速く (3時間50分28秒 \pm 11分28秒, 平均値 \pm 標準誤差), 1日目および2日目の完走時間との間には有意な差も認められた。また、7日目の完走時間は対象者の自己記録と約3分の差でしかなかった。さらに、

7 日目のマラソンレースから 20–24 時間後の血液検査によって評価された筋損傷への影響は些細なものであった。これは、習慣的なトレーニングによって、繰り返し効果を獲得しているからだと考えられる。以上を踏まえると、マラソンレース後の筋損傷は、トレーニング状況によって影響を受け、**Trained runner** やレース経験の豊富なランナーに比べるとトレーニング量の少ないランナーで著しいと考えられる。

研究課題 4 では、レースペースを絶対的パフォーマンス、目標ペースに対するレースペースの達成率を相対的パフォーマンスとして、レースパフォーマンスが筋痛に与える影響についても検討した。その結果、筋痛の曲線下面積は、レースパフォーマンスの高低による有意な差が認められなかった。したがって、レースパフォーマンスはトレーニング状況に比べると、筋損傷に与える影響は軽微だと考えられる。生理学的指標についても $\dot{V}O_2\text{max}$ および V_{max} は、**Novice runner** (研究課題 2)、2 時間 30 分程度の記録で完走した **Fast runner** (Zouhal et al., 2006) のいずれを対象としても 3 日後には回復することが明らかとなっている。また、研究課題 3 では、**Trained runner** を対象として、レースパフォーマンスの高いランナーも含めた上で、マラソンレース 1 週間後の生理学的指標およびパフォーマンスを体系的に検討した結果、いずれの指標もレース前と 7 日後の数値は同等であった。以上を踏まえると、例えばレースを高いパフォーマンスで完走できたランナーであっても、マラソンレースから 1 週間後には、生理学的指標およびパフォーマンス指標は回復すると考えられる。

2) 現場への示唆

市民ランナーの中には、隔週の頻度でマラソンレースに出場するランナーが少なくない。その中には、世界選手権日本代表に 3 度選ばれた川内優輝選手のような一流ランナーもいる。一方、高頻度でのレース出場は不十分な回復を招きオーバーリーチングを誘発する可能性がある。オーバーリーチングとは、トレーニングまたはトレーニング以外のストレス

の蓄積によって短期的にパフォーマンスが低下した状態のことをさす (Coutts et al., 2007b). Aubry et al. (2014) は, 23 名の男性トライアスロン選手を対象として, 3 週間の過負荷トレーニング期と 4 週間のテーパリング期の後にそれぞれパフォーマンスを評価している. その結果, 過負荷トレーニング後にオーバーリーチングになった対象者はならなかった対象者と比べてテーパリング期におけるパフォーマンスの改善度が低かった. この知見は, オーバーリーチングになることがトレーニングによる適応を妨げる可能性があることを示している. そこで本節では, 本研究の結果をもとに隔週の頻度でマラソンレースに出場するランナーを対象として, レース後の至適な過ごし方やオーバーリーチングを避けるためのトレーニング戦略に関する示唆を述べる.

筋損傷の代表的な症状である最大筋力の低下は, ランニング障害の原因となる可能性が指摘されている (Niemuth et al., 2005). 加えて, 筋損傷によってランニングフォームが変容することも報告されている (Chen et al., 2007b). 先行研究によると, 10 日間の脱トレーニングでは $\dot{V}O_{2max}$ は低下しない (Cullinane et al., 1986). また, 生理学的指標の低下は, 脱トレーニング開始から 2 週間以降でより顕著となる (Mujika and Padilla, 2008). これらの先行研究と本研究の結果を踏まえると, マラソンレース後, 筋損傷が顕著な 3 日間程度は消極的休息とし, その後は着地衝撃を伴わない自転車運動などのクロストレーニングを行った後, 最初のレースから 1 週間後以降は, 通常のレース前と同様に, トレーニング量を抑えたテーパリングを実施するのが望ましい. 実際, このようなアプローチは 2 週間の間隔で開催されるアイアンマントライアスロンレースとオフロードトライアスロンの世界選手権レースに出場するエリートトライアスロン選手が取り入れている (Mujika, 2013). また, マラソンレース後の筋損傷は, レース前後の栄養戦略 (Howatson et al., 2010), レース後における Unstable rocker shoes (Nakagawa et al., 2018) やコンプレッションタイツ (Hill et al., 2014) の着用によって軽減できることが報告されている. 例えば, Howatson et al. (2010) の研究では, マラソンレースの 5 日前から 48 時間後にか

けてタルトチェリージュースを摂取したランナーはプラセボ飲料を摂取したランナーに比べると膝関節伸展の MVIC トルクの回復が早かったことが報告されている。したがって、これらの各種方策の実施もマラソンレース後の回復を促進するために有効なアプローチだと考えられる。

研究課題 5-2 では、実際に短期間に高頻度でマラソンレースに出場した **Fast runner** を対象として、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復に加え、**Training load** と **Hooper** の質問紙による主観的体調との関係を検討した。その結果、睡眠以外の項目と **Training load** との間には有意な相関関係が認められた。これは、**Hooper** の質問紙が市民ランナーのトレーニングやレースによる負荷を反映する指標であることを示している。一方、睡眠と **Training load** との間には有意な相関関係は認められず、睡眠は **Training load** 以外のカフェインやアルコールの摂取、電子機器の利用といったその他の要因による影響を受けていた可能性が考えられた。また、研究課題 5-2 の対象者は、実験当時大学院修士課程 2 年次の学生であり、修士論文に関する実験および執筆を行っていたことから、学業の進捗状況によって睡眠時間が左右され、そのことが睡眠に影響を与えていた可能性もある。市民ランナーの多くは、仕事や学業、家事、育児との両立を図りながらトレーニングを行っている。したがって、市民ランナーのパフォーマンスを最適化させていく上では、トレーニングやレースによる負荷とそれ以外の日常生活によるストレスを反映する指標をもとに回復状況を評価することが望ましい。**Hooper** の質問紙は、睡眠、ストレス、疲労、筋痛の 4 項目について 7 段階の尺度をもとに回答するものであり、1 日 1 分未満で回答できることから実用性が高い。研究課題 5-2 においては、実験期間中の対象者のパフォーマンス指標が一定であったため、その結果をもとに **Hooper** の質問紙によるオーバーリーチングを予測する有効性については言及できないものの、エリートトライアスロン選手を対象とした事例研究によると、オーバーリーチングになった選手は、**Hooper** の質問紙による睡眠の過当たりの数値が徐々に悪化していたことが報告されている (Plews et al.,

2012). したがって、市民ランナーがオーバーリーチングや傷害を防ぎながら、マラソンシーズンを過ごしてく上で、**Training load** と **Hooper** の質問紙による主観的体調を同時に定量していくことは有益な手法になると考えられる。

3) 本研究の限界および今後の課題

本研究では、はじめにマラソンレースによる筋損傷が生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響について検討した（研究課題 1・2）。その結果、筋力トレーニングや DHR によって引き起こされる筋損傷と同様に、マラソンレースによって生じた筋損傷も生理学的指標およびパフォーマンス指標を低下させることが明らかとなった。その一方で本研究では、筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との因果関係については直接検討できていない。また、これまでのところ、筋損傷によって生理学的指標が低下する詳細なメカニズムは明らかになっていない（Caldwell et al., 2016）。しかし、繰り返し効果によって筋損傷抑制効果を獲得した後では、例え同一の筋損傷誘発運動を実施したとしても生理学的指標およびパフォーマンスの低下が抑制されることが報告されている（Burt et al., 2015）。したがって、筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンスの低下との関係には因果関係があると考えられる。今後は、マラソンレース後の筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標との因果関係を明らかにするために、より多くの対象者をもとに検討していく必要がある。

本研究における全ての対象者は、40 歳未満であり、ほとんどが学生ランナーであった。トレイルランニングレースを対象とした研究ではあるものの、若年ランナーと比べると 40 歳以上のマスターランナーでは MVIC トルクと自転車運動における効率の回復が遅いことも報告されている（Easthope et al., 2010）。また、トライアスロンレースを対象とした研究によると、若年選手に比べるとマスター選手では、レース後におけるパフォーマンス指標の低下が著しい（Sultana et al., 2012）、著者の知る限り、マラソンレース後の筋損

マラソンレース後の筋損傷が顕著な2-3日後にレースペースで30分間のランニングを実施すると、CKが著しく増加することも報告されていることから (Maresh et al., 1989), レース直後における過剰なトレーニングの実施は回復を遅延させたり, オーバーリーチングを誘発することが考えられる。しかし, 研究課題5はそれぞれ1名のランナーを対象とした事例研究であり, レース後に **Training load** を高めたランナーの生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復については検討できていない。したがって, 短期間に高頻度でレースに出場するランナーにおけるレース期での最適なトレーニング戦略を確立するにあたっては, さらなる研究が必要である。

X. 結論

本研究では、市民ランナーにおけるマラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復を筋損傷との関係から検討した。その結果、マラソンレース後、筋損傷が生じている期間における生理学的指標およびパフォーマンス指標は低下し、筋損傷から回復した場合、その現象は認められなくなることが明らかとなった。また、マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標は、レースパフォーマンスに関わらず1週間後には回復することも示された。その一方で、マラソンレース後の筋痛は、トレーニング状況の影響を受け、レース前のトレーニング量の少ないランナーでは、著しい筋痛が生じ、レース後の日常生活に与える影響が大きかった。

事例研究として、実際に短期間に高頻度でマラソンレースに出場したランナーを対象として **Training load**、生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復ならびに **Traininig load** と主観的体調との関係を検討した。その結果、短期間に高頻度でマラソンレースに出場し、オーバーリーチングにならなかったランナーは、レース期ではレース以外のトレーニングの量と強度を減らしていた。また、**Hooper** の質問紙による主観的体調は、マラソンシーズン中の **Training load** や日常生活によるストレスを反映する指標である可能性が認められた。したがって、市民ランナーがオーバーリーチングや傷害を防ぎながら、マラソンシーズンを過ごしていく上で、**Training load** と **Hooper** の質問紙による主観的体調を同時に定量することは有益な手法になると考えられる。

以上の結果より、市民ランナーにおけるマラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標は、1週間後には回復することが明らかとなった。また、マラソンレースによる著しい筋損傷を防ぐために、市民ランナーはレース前のトレーニング量を確保すべきことが示唆される。

XI. 参考文献

- Alves Pasqua, L., Damasceno, M. V., Bueno, S., Zagatto, A. M., D. E. Araújo, G. G., Lima-Silva, A. E., and Bertuzzi, R. (2018). Determinant factors of peak treadmill speed in physically active men. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 58: 204-209.
- Amann, M., Subudhi, A. W., and Foster, C. (2006). Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 16: 27-34.
- Armstrong, S. A. Till, E. S., Maloney, S. R. and Harris, G. A. (2015). Compression socks and functional recovery following marathon running: a randomized controlled trial. *J. Strength Cond. Res.*, 29: 528-533.
- Asp, S., Daugaard, J. R., Rohde, T., Adamo, K., and Graham, T. (1999). Muscle glycogen accumulation after a marathon: roles of fiber type and pro- and macroglycogen. *J. Appl. Physiol.*, 86: 474-478.
- Asp, S., Rohde, T., and Richter, E. A. (1997). Impaired muscle glycogen resynthesis after a marathon is not caused by decreased muscle GLUT-4 content. *J. Appl. Physiol.*, 83: 1482-1485.
- Aubry, A., Hausswirth, C., Louis, J., Coutts, A. J., and Le Meur, Y. (2014). Functional overreaching: the key to peak performance during the taper? *Med. Sci. Sports Exerc.*, 46: 1769-1777.
- Barnes, K. R. and Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Med. Open*, 1: 9.
- Bassett, D. R. Jr. and Howley, E. T. (1997). Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 29: 591-603.
- Bassett, D. R. Jr. and Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen

- uptake and determinants of endurance performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32: 70-84.
- Baumann, C. W., Green, M. S., Doyle, J. A., Rupp, J. C., Ingalls, C. P., and Corona, B. T. (2014). Muscle injury after low-intensity downhill running reduces running economy. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 1212-1218.
- Beaver, W. L., Wasserman, K., and Whipp, B. J. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J. Appl. Physiol.*, 60: 2020-2027.
- Billat, V. L., Demarle, A., Slawinski, J., Paiva, M., and Koralsztein, J. P. (2001). Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 2089-2097.
- Billat, V. L., Petot, H., Landrain, M., Meilland, R., Koralsztein, J. P., and Mille-Hamard, L. (2012). Cardiac output and performance during a marathon race in middle-aged recreational runners. *ScientificWorldJournal*, 212: 810859.
- Bishop, P. A., Jones, E., and Woods, A. K. (2008). Recovery from training: a brief review: brief review. *J. Strength Cond. Res.*, 22: 1015–1024.
- Black, C. D., Gonglach, A. R., Hight, R. E., and Renfroe, J. B. (2015). Time-course of recovery of peak oxygen uptake after exercise-induced muscle damage. *Respir. Physiol. Neurobiol.*, 216: 70-77.
- Borg, G. A. (1973). Perceived exertion: a note on “history” and methods. *Med. Sci. Sports*, 5: 90-93.
- Braun, W. A. and Dutto, D. J. (2003). The effects of a single bout of downhill running and ensuing delayed onset of muscle soreness on running economy performed 48 h later. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 90: 29-34.
- Buchheit, M., Racinais, S., Bilsborough, J. C., Bourdon, P. C., Voss, S. C., Hocking, J.,

- Cordy, J., Mendez-Villanueva, A., and Coutts, A. J. (2013). Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players. *J. Sci. Med. Sport*, 16: 550-555.
- Burt, D., Lamb, K., Nicholas, C., and Twist, C. (2012). Effects of muscle-damaging exercise on physiological, metabolic, and perceptual responses during two modes of endurance exercise. *J. Exerc. Sci. Fit.*, 10: 70-77.
- Burt, D., Lamb, K., Nicholas, C., and Twist, C. (2013). Effects of repeated bouts of squatting exercise on sub-maximal endurance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 113: 285-293.
- Burt, D. G., Lamb, K., Nicholas, C., and Twist, C. (2014). Effects of exercise-induced muscle damage on resting metabolic rate, sub-maximal running and post-exercise oxygen consumption. *Eur. J. Sports Sci.*, 14: 337-344.
- Burt, D., Lamb, K., Nicholas, C., and Twist, C. (2015). Lower-volume muscle-damaging exercise protects against high-volume muscle-damaging exercise and the detrimental effects on endurance performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115: 1523-1532.
- Burt, D. G. and Twist, C. (2011). The effects of exercise-induced muscle damage on cycling time-trial performance. *J. Strength Cond. Res.*, 25: 2185-2192.
- Caldwell, J. T., Wardlow, G. C., Branch, P. A., Ramos, M., Black, C. D., and Ade, C. J. (2016). Effect of exercise-induced muscle damage on vascular function and skeletal muscle microvascular deoxygenation. *Physiol. Rep.*, 4: e13032.
- Cavanagh, P. R. and LaFortune, M. A. (1980). Ground reaction forces in distance running. *J. Biomech.*, 13: 394-406.
- Chen, T. C., Chen, H. L., Wu, C. J., Lin, M. R., Chen, C. H., Wang, L. I., Wang, S. Y.,

- and Tu, J. H. (2007a). Changes in running economy following a repeated bout of downhill running. *J. Exerc. Sci. Fit.*, 5: 109-117.
- Chen, T. C., Nosaka, K., Lin, M. J., Chen, H. L., and Wu, C. J. (2009). Changes in running economy at different intensities following downhill running. *J. Sports Sci.*, 27: 1137-1144.
- Chen, T. C., Nosaka, K., and Tu, J. H. (2007b). Changes in running economy following downhill running. *J. Sports Sci.*, 25: 55-63.
- Chen, T. C., Nosaka, K., and Wu, C. C. (2008). Effects of a 30-min running performed daily after downhill running on recovery of muscle function and running economy. *J. Sci. Med. Sport*, 11: 271-279.
- Christmas, B. C., Taylor, L., Siegler, J. C., and Midgley, A. W. (2017a). A reduction in maximal incremental exercise test duration 48 h post downhill run is associated with muscle damage derived exercise-induced pain. *Front. Physiol.*, 8: 135.
- Christmas, B. C., Taylor, L., Siegler, J. C., and Midgley, A. W. (2017b). Muscle-damaging exercise 48 h prior to a maximal incremental exercise treadmill test reduces time to exhaustion: is it time to reconsider our pretest procedures? *Res. Sports Med.*, 25: 11-25.
- Clarkson, P. M., Nosaka, K., and Braun, B. (1992). Muscle function after exercise-induced muscle damage and rapid adaptation. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 24: 512-520.
- Clifford, T., Allerton, D. M., Brown, M. A., Harper, L., Horsburgh, S., Keane, K. M., Stevenson, E. J., and Howatson, G. (2017). Minimal muscle damage after a marathon and no influence of beetroot juice on inflammation and recovery. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 42: 263-270.

- Cohen J. (1988). Statistical power analysis for the behavioral sciences (2nd ed.). New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Coutts, A., Reaburn, P., Piva, T. J., and Murphy, A. (2007a). Changes in selected biochemical, muscular strength, power, and endurance measures during deliberate overreaching and tapering in rugby league players. *Int. J. Sports Med.*, 28: 116-124.
- Coutts, A. J., Wallace, L. K., and Slattery, K. M. (2007b). Monitoring changes in performance, physiology, biochemistry, and psychology during overreaching and recovery in triathletes. *Int. J. Sports Med.*, 28: 125-134.
- Cullinane, E. M., Sady, S. P., Vadeboncoeur, L., Burke, M., and Thompson, P. D. (1986). Cardiac size and VO₂max do not decrease after short-term exercise cessation. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 18: 420-424.
- Dannecker, E. A., Koltyn, K. F., Riley, J. L. 3rd, and Robinson, M. E. (2003). Sex differences in delayed onset muscle soreness. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 43: 78-84.
- Dannecker, E. A., Liu, Y., Rector, R. S., Thomas, T. R., Fillingim, R. B., and Robinson, M. E. (2012). Sex differences in exercise-induced muscle pain and muscle damage. *J. Pain*, 13: 1242-1249.
- Davies, C. T. and Thompson, M. W. (1979). Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 41: 233-245.
- Davies, R. C., Rowlands, A. V., and Eston, R. G. (2009). Effect of exercise-induced muscle damage on ventilatory and perceived exertion responses to moderate and severe intensity cycle exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 107: 11-19.
- Davies, R. C., Rowlands, A. V., Poole, D. C., Jones, A. M., and Eston, R. G. (2011). Eccentric exercise-induced muscle damage dissociates the lactate and gas exchange

- thresholds. *J. Sports Sci.*, 29: 181-189.
- di Prampero, P. E., Salvadeo, D., Fusi, S., and Grassi, B. (2009). A simple method for assessing the energy cost of running during incremental tests. *J. Appl. Physiol.*, 107: 1068-1075.
- Doma, K., Schumann, M., Sinclair, W. H., Leicht, A. S., Deakin, G. B., and Häkkinen, K. (2015). The repeated bout effect of typical lower body strength training sessions on sub-maximal running performance and hormonal response. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115: 1789-1799.
- Dressendorfer, R. H. (1991). Acute reduction in maximal oxygen uptake after long-distance running. *Int. J. Sports Med.*, 12: 30-33.
- Easthope, C. S., Hausswirth, C., Louis, J., Lepers, R., Vercruyssen, F., and Brisswalter, J. (2010). Effects of a trail running competition on muscular performance and efficiency in well-trained young and master athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 110: 1107–1116.
- Engeroff, T., Bernardi, A., Niederer, D., Wilke, J., Vogt, L., and Banzer, W. (2017). Intensity related changes of running economy in recreational level distance runners. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 57: 1111-1118.
- Farrell, P. A., Wilmore, J. H., Coyle, E. F., Billing, J. E., and Costill, D. L. (1979). Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports*, 11: 338-344.
- Faude, O., Kellmann, M., Ammann, T., Schnittker, R., and Meyer T. (2011). Seasonal changes in stress indicators in high level football. *Int. J. Sports Med.*, 32: 259-265.
- Fletcher, J. R., Esau, S. P., and Macintosh, B. R. (2009). Economy of running: beyond the measurement of oxygen uptake. *J. Appl. Physiol.*, 107: 1918-1922.

- Foster, C. (1983). VO₂max and training indices as determinants of competitive running performance. *J. Sports Sci.*, 1: 13-22.
- Foster, C., Daniels, J. T., and Yarbrough, R. A. (1977). Physiological and training correlated of marathon running performance. *Aust. J. Sports Medicine*, 9: 58-61.
- Gaskill, S. E., Ruby, B. C., Walker, A. J., Sanchez, O. A., Serfass, R. C., and Leon, A. S. (2001). Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33: 1841-1848.
- Hagan, R. D., Smith, M. G., and Gettman, L. R. (1981). Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 13: 185-189.
- Hagan, R. D., Upton, S. J., Duncan, J. J., and Gettman, L. R. (1987). Marathon performance in relation to maximal aerobic power and training indices in female distance runners. *Br. J. Sports Med.*, 21: 3-7.
- Hamill, J., Freedson, P. S., Clarkson, P. M., and Braun, B. (1991). Muscle soreness during running: biomechanical and physiological considerations. *Int. J. Sport Biomech.*, 7: 125-137.
- Helgerud, J. (1994). Maximal oxygen uptake, anaerobic threshold and running economy in women and men with similar performances level in marathons. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 68: 155-161.
- Helgerud, J., Ingjer, F., and Strømme, S. B. (1990). Sex differences in performance-matched marathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 61: 433-439.
- Helgerud, J., Støren, Ø., and Hoff, J. (2010). Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? *Eur. J. Appl. Physiol.*, 108: 1099-1105.

- Hill, J. A., Howatson, G., van Someren, K. A., Walshe, I., and Pedlar, C. R. (2014). Influence of compression garments on recovery after marathon running. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 2228-2235.
- Höchli, D., Schneiter, T., Ferretti, G., Howald, H., Claassen, H., Moia, C., Atchou, G., Belleri, M., Veicsteinas, A., and Hoppeler, H. (1995). Loss of muscle oxidative capacity after an extreme endurance run: the Paris-Dakar foot-race. *Int. J. Sports Med.*, 16: 343-346.
- Hooper, S. L., Mackinnon, L. T., Howard, A., Gordon, R. D., and Bachmann, A. W. (1995). Markers for monitoring overtraining and recovery. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27: 106-112.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., and Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 41: 3-13.
- Hottenrott, K., Ludyga, S., Schulze, S., Gronwald, T., and Jäger, F. S. (2016). Does a run/walk strategy decrease cardiac stress during a marathon in non-elite runners? *J. Sci. Med. Sport*, 19: 64-68.
- Howatson, G., McHugh, M. P., Hill, J. A., Brouner, J., Jewell, A. P., van Someren, K. A., Shave, R. E., and Howatson, S. A. (2010). Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 20: 843-852.
- Ishikura, K., Miyazaki, T., R. A., Song-Gyu, and Ohmori, H. (2014). The ameliorating effect of branched-chain amino acids ingestion on different types of muscle soreness after swimming and full-marathon running. *Adv. Exerc. Sports Physiol.*, 20: 9-17.
- Jacobs, I., Sjödin, B., Kaiser, P., and Karlsson, J. (1981). Onset of blood lactate accumulation after prolonged exercise. *Acta. Physiol. Scand.*, 112: 215-217.

- Johnson, E. C., Pryor, J. L., Casa, D. J., Belval, L. N., Vance, J. S., DeMartini, J. K., Maresh, C. M., and Armstrong, L. E. (2015). Bike and run pacing on downhill segments predict Ironman triathlon relative success. *J. Sci. Med. Sport*, 18: 82-87.
- Joyner, M. J. (1991). Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J. Appl. Physiol.*, 70: 683-687.
- Karlstedt, E., Chelvanathan, A., Da Silva, M., Cleverley, K., Kumar, K., Bhullar, N., Lytwyn, M., Bohonis, S., Oomah, S., Nepomuceno, R., Du, X., Melnyk, S., Zeglinski, M., Ducas, R., Sefidgar, M., Mackenzie, S., Sharma, S., Kirkpatrick, I. D., and Jassal, D. S. (2012). The impact of repeated marathon running on cardiovascular function in the aging population. *J. Cardiovasc. Magn. Reson.*, 14: 58.
- Karstoft, K., Solomon, T. P., Laye, M. J., and Pedersen, B. K. (2013). Daily marathon running for a week—the biochemical and body compotional effects of participation. *J. Strength Cond. Res.* 27: 2927-2933.
- Kim, H. Y., Lee, Y. H., and Kim, C. K. (2009). Changes in serum cartilage oligomeric matrix protein (COMP), plasma CPK and plasma hs-CRP in relation to running distance in a marathon (42.195 km) and an ultra-marathon (200 km) race. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 105: 765-770.
- Knebel, F., Schimke, I., Schroeckh, S., Peters, H., Eddicks, S., Schattke, S., Brechtel, L., Lock, J., Wernecke, K. D., Dreger, H., Grubitz, S., Schmidt, J., Baumann, G., and Borges, A. C. (2009). Myocardial function in older male amateur marathon runners: assessment by tissue Doppler echocardiography, speckle tracking, and cardiac biomarkers. *J. Am. Soc. Echocardiogr.*, 22: 803-809.
- Kobayashi, Y., Takeuchi, T., Hosoi, T., Yoshizaki, H., and Loeppky, J. A. (2005). Effect of a marathon run on serum lipoproteins, creatine kinase, and lactate dehydrogenase

- in recreational runners. *Res. Q. Exerc. Sport*, 76: 450-455.
- Krustrup, P., Ortenblad, N., Nielsen, J., Nybo, L., Gunnarsson, T. P., Iaia, F. M., Madsen, K., Stephens, F., Greenhaff, P., and Bangsbo, J. (2011). Maximal voluntary contraction force, SR function and glycogen resynthesis during the first 72 h after a high-level competitive soccer game. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 111: 2987-2995.
- クロス・マーケティング (2013). 「マラソンランナーの疲労」に関する意識調査.
<https://prtimes.jp/main/html/rd/p/0000000003.000004729.html>, 2017 年 5 月 1 日閲覧
- Kyröläinen, H., Pullinen, T., Candau, R., Avela, J., Huttunen, P., and Komi, P. V. (2000). Effects of marathon running on running economy and kinematics. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82: 297-304.
- Laplaud. D. and Menier, R. (2003). Reproducibility of the instant of equality of pulmonary gas exchange and its physiological significance. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 43: 437-443.
- Larsson, P., Olofsson, P., Jakobsson, E., Burlin, L., and Henriksson-Larsén, K. (2002). Physiological predictors of performance in cross-country skiing from treadmill tests in male and female subjects. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 12: 347-353.
- Legaz-Arrese, A., Munguía-Izquierdo, D., and Serveto-Galindo, J. R. (2006). Physiological measures associated with marathon running performance in high-level male and female homogeneous groups. *Int. J. Sports Med.*, 27: 289-295.
- Liang, M. T., Allen, T. W., McKeigue, M. E., Kotis, A., and Gierke, L. W. (2001). Effect of cooling on muscular health prior to running a marathon. *J. Am. Osteopath. Assoc.*, 101: 219-225.
- Loftin, M., Sothorn, M., Koss, C., Tuuri, G., Vanvrancken, C., Kontos, A., and Bonis, M. (2007). Energy expenditure and influence of physiologic factors during marathon

- running. *J. Strength Cond. Res.*, 21: 1188-1191.
- Loftin, M., Sothorn, M., Tuuri, G., Tompkins, C., Koss, C., and Bonis, M. (2009). Gender comparison of physiologic and perceptual responses in recreational marathon runners. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 4: 307-316.
- Lourenço, T. F., Martins, L. E., Tessutti, L. S., Brenzikofer, R., and Macedo, D. V. (2011). Reproducibility of an incremental treadmill VO₂max test with gas exchange analysis for runners. *J. Strength Cond. Res.*, 25: 1994-1999.
- Lucía, A., Hoyos, J., Pérez, M., and Chicharro, J. L. (2000). Heart rate and performance parameters in elite cyclists: a longitudinal study. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 32: 1777-1782.
- Marcora, S. M. and Bosio, A. (2007). Effect of exercise - induced muscle damage on endurance running performance in humans. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 17: 662-671.
- Maresh, C. M., Allison, T. G., Noble, B. J., Drash, A., and Kraemer, W. J. (1989). Substrate and hormone responses to exercise following a marathon run. *Int. J. Sports Med.*, 10: 101-106.
- Maron, M. B., Horvath, S. M., and Wilkerson, J. E. (1977). Blood biochemical alterations during recovery from competitive marathon running. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 10: 231-238.
- Martin, T. G., Pata, R. W., D'Addario, J., Yuknis, L., Kingston, R., and Feinn, R. (2015). Impact of age on haematological markers pre- and post-marathon running. *J. Sports Sci.*, 33: 1988-1997.
- McHugh, M. P. Connolly, D. A., Eston, R. G., and Gleim, G. W. (1999). Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med.*, 27: 157-170.

- McLaughlin, J. E., Howley, E. T., Bassett, D. R. Jr., Thompson, D. L., and Fitzhugh, E. C. (2010). Test of the classic model for predicting endurance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 42: 991-997.
- Mercer, J. A., Vance, J., Hreljac, A., and Hamill, J. (2002). Relationship between shock attenuation and stride length during running at different velocities. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 87: 403-408.
- Metcalfe, A. J., Menaspà, P., Villerius, V., Quod, M., Peiffer, J. J., Govus, A. D., and Abbiss, C. R. (2017). Within-season distribution of external training and racing workload in professional male road cyclists. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 12: S2142-S2146.
- Moalla, W., Fessi, M. S., Farhat, F., Nouira, S., Wong, D. P., and Dupont, G. (2016). Relationship between daily training load and psychometric status of professional soccer players. *Res. Sports Med.*, 24: 387-394.
- Morgan, D. W., Bransford, D. R., Costill, D. L., Daniels, J. T., Howley, E. T., and Krahenbuhl, G. S. (1995). Variation in the aerobic demand of running among trained and untrained subjects. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 27: 404-409.
- 森寿仁・竹内良人・大田敬介・山本正嘉 (2014). 市民マラソンレースにおけるランナーの疲労特性とパフォーマンスに関連する要因：いぶすき菜の花マラソンを対象とした調査研究. *ランニング学研究*, 25: 1-10.
- Mujika, I. (2013). Recovery between Ironman and XTERRA triathlon world championships. In C. Hausswirth and I. Mujika (Eds.), *Recovery for performance in sport* (pp. 81-82). Human kinetics.
- Mujika, I. (2014). Olympic preparation of a world-class female triathlete. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 9: 727-731.

- Mujika, I. and Padilla, S. (2008). Physiological and Performance Consequences of Training Cessation in Athletes: Detraining. In *Rehabilitation of Sports Injuries: Scientific Basis* (pp. 117–143). Oxford, UK: Blackwell Science Ltd.
- 鍋倉賢治・永井純・斉藤慎一・宮下憲・白木仁・大木昭一郎 (1996). 自由科目「つくばマラソン」の授業報告 (1). *大学体育研究*, 18: 59-75.
- Nakagawa, K., Inami, T., Yonezu, T., Kenmotsu, Y., Narita, T., Kawakami, Y., and Kanosue, K. (2017). Unsable rocker shoes promote recovery from marathon-induced muscle damage in novice runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 621-629.
- Nédélec, M., Halson, S., Abaidia, A. E., Ahmaidi, S., and Dupont, G. (2015). Stress, sleep and recovery in elite soccer: a critical review of the literature. *Sports Med.*, 45: 1387-1400.
- Nedelec, M., McCall, A., Carling, C., Legall, F., Berthoin, S., and Dupont, G. (2014). The influence of soccer playing actions on the recovery kinetics after a soccer match. *J. Strength Cond. Res.*, 28: 1517-1523.
- Neilan, T. G., Januzzi, J. L., Lee-Lewandrowski, E., Ton-Nu, T. T., Yoerger, D. M., Jassal, D. S., Lewandrowski, K. B., Siegel, A. J., Marshall, J. E., Douglas, P. S., Lawlor, D., Picard, M. H., and Wood, M. J. (2006a). Myocardial injury and ventricular dysfunction related to training levels among nonelite participants in the Boston marathon. *Circulation*, 114: 2325-2333.
- Neilan, T. G., Yoerger, D. M., Douglas, P. S., Marshall, J. E., Halpern, E. F., Lawlor, D., Picard, M. H., and Wood, M. J. (2006b). Persistent and reversible cardiac dysfunction among amateur marathon runners. *Eur. Heart J.*, 27: 1079-1084.
- Niemuth, P. E., Johnson, R. J., Myers, M. J., and Thieman, T. J. (2005). Hip muscle weakness and overuse injuries in recreational runners. *Clin. J. Sport Med.*, 15:

14-21.

Noakes, T. D. (2007). The central governor model of exercise regulation applied to the marathon. *Sports Med.*, 37: 374-377.

Noakes, T. D. and Carter, J. W. (1982). The responses of plasma biochemical parameters to a 56-km race in novice and experienced ultra-marathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 49: 179-186.

Noakes, T. D., Myburgh, K. H., and Schall, R. (1990). Peak treadmill running velocity during the VO₂max test predicts running performance. *J. Sports Sci.*, 8: 35-45.

Noble, B. J., Maresh, C. M., Allison, T. G., and Drash, A. (1979). Cardio-respiratory and perceptual recovery from a marathon run. *Med. Sci. Sports*, 11: 239-243.

Nosaka, K., Abbiss, C. R., Watson, G., Wall, B., Suzuki, K., and Laursen, P. (2010). Recovery following an Ironman triathlon: a case study. *Eur. J. Sport Sci.*, 10: 159-165.

Nosaka, K., Newton, M., and Sacco, P. (2002). Muscle damage and soreness after endurance exercise of the elbow flexors. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 34: 920-927.

Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait Posture*, 7: 77-95.

Nunes, J. A., Moreira, A., Crewther, B. T., Nosaka, K., Viveiros, L., and Aoki, M. S. (2014). Monitoring training load, recovery-stress state, immune-endocrine responses, and physical performance in elite female basketball players during a periodized training program. *J. strength Cond. Res.*, 28: 2973-2980.

小野寺孝一・宮下充正 (1976). 全身持久性運動における主観的運動強度と客観的強度の対応性 : Rating of perceived exertion の観点から. *体育学研究*, 21: 191-203.

Oosthuyse, T. and Bosch A. N. (2017). The effect of gender and menstrual phase on serum creatine kinase activity and muscle soreness following downhill running.

Antioxidants, 6: 16.

Paschalis, V., Koutedakis, Y., Baltzopoulos, V., Mougios, V., Jamurtas, A. Z., and Theoharis, V. (2005a). The effects of muscle damage on running economy in healthy males. *Int. J. Sports Med.*, 26: 827-831.

Paschalis, V., Koutedakis, Y., Jamurtas, A. Z., Mougios, V., and Baltzopoulos, V. (2005b). Equal volumes of high and low intensity of eccentric exercise in relation to muscle damage and performance. *J. Strength Cond. Res.*, 19: 184-188.

Pate, R. R. and Kriska, A. (1984). Physiological basis of the sex difference in cardiorespiratory endurance. *Sports Med.*, 1: 87-98.

Perrault, H., Péronnet, F., Lebeau, R., and Nadeau, R. A. (1986). Echocardiographic assessment of left ventricular performance before and after marathon running. *Am. Heart J.*, 112: 1026-1031.

Petersen, K., Hansen, C. B., Aagaard, P., and Madsen, K. (2007). Muscle mechanical characteristics in fatigue and recovery from a marathon race in highly trained runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 101: 385-396.

Petibois, C., Cazorla, G., Poortmans, J. R., and Déléris, G. (2002). Biochemical aspects of overtraining in endurance sports: a review. *Sports Med.*, 32: 867-878.

Pinot, J. and Grappe, F. (2015). A six-year monitoring case study of a top-10 cycling grand tour finisher. *J. Sports Sci.*, 33: 907-914.

Plews, D. J., Laursen, P. B., Kilding, A. E., and Buchheit, M. (2012). Heart rate variability in elite triathletes, is variation in variability the key to effective training? A case comparison. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 112: 3729-3741.

Polak, A. A., van Linge, B., Ruttern, F. L., and Stijnen, T. (1993). Effect of intravenous fluid administration on recovery after running a marathon. *Br. J. Sports Med.*, 27:

205-208.

ランナーズ編集部 (2016). 第 12 回全日本マラソンランキング. アールビーズ : 東京, pp. 2-5.

ランニング文化研究所編 (1993). 全国フルマラソンランキング Vol.5. ランニング文化研究所 : 東京, pp. 2-6.

Rasmussen, C. H., Nielsen, R. O., Juul, M. S., and Rasmussen, S. (2013). Weekly running volume and risk of running-related injuries among marathon runners. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 8: 111-120.

Rhodes, E. C. and McKenzie, D. C. (1984). Predicting marathon time from anaerobic threshold measurements. *Physi. Sportsmed.*, 12: 95-98.

Rinard, J., Clarkson, P. M., Smith, L. L., and Grossman, M. (2000). Response of males and females to high-force eccentric exercise. *J Sports Sci.*, 18: 229-236.

Roecker, K., Schotte, O., Niess, A. M., Horstmann, T., and Dickhuth, H. H. (1998). Predicting competition performance in long-distance running by means of a treadmill test. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 30: 1552-1557.

Ross, E., Middleton, N., Shave, R., George, K., and McConnell, A. (2008). Changes in respiratory muscle and lung function following marathon running in man. *J. Sports Sci.*, 26: 1295-1301.

Sanchez, L. D., Corwell, B., and Berkoff, D. (2006). Medical problems of marathon runners. *Am. J. Emerg. Med.*, 24: 608-615.

Satkunskienė, D., Stasiulis, A., Zaičėnkoviėnė, K., Sakalauskaitė, R., and Rautkys, D. (2015). Effect of muscle-damaging eccentric exercise on running kinematics and economy for running at different intensities. *J. Strength Cond. Res.*, 29: 2404-2411.

Saunders, P. U., Cox, A. J., Hopkins, W. G., and Pyne, D. B. (2010). Physiological

- measures tracking seasonal changes in peak running speed. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 5: 230-238.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., and Hawley, J. A. (2004a). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med.*, 34: 465-485.
- Saunders, P. U., Pyne, D. B., Telford, R. D., and Hawley, J. A. (2004b). Reliability and variability of running economy in elite distance runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36: 1972-1976.
- Schwane, J. A., Williams, J. S., and Sloan, J. H. (1987). Effects of training on delayed muscle soreness and serum creatine kinase activity after running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 19: 584-590.
- Scott, K. E., Rozenek, R., Russo, A. C., Crussemeyer, J. A., and Lacourse, M. G. (2003). Effects of delayed onset muscle soreness on selected physiological responses to submaximal running. *J. Strength Cond. Res.*, 17: 652-658.
- Scrimgeour, A. G., Noakes, T. D., Adams, B., and Myburgh, K. (1986). The influence of weekly training distance on fractional utilization of maximum aerobic capacity in marathon and ultramarathon runners. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 55: 202-209.
- Seiler, S., Haugen, O., and Kuffel, E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 39: 1366-1373.
- Sewright, K. A., Hubal, M. J., Kearns, A., Holbrook, M. T., and Clarkson, P. M. (2008). Sex differences in response to maximal eccentric exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 40: 242-251.
- Sherman, W. M., Armstrong, L. E., Murray, T. M., Hagerman, F. C., Costill, D. L.,

- Staron, R. C., and Ivy, J. L. (1984). Effect of a 42.2-km footrace and subsequent rest or exercise on muscular strength and work capacity. *J. Appl. Physiol.*, 57: 1668-1673.
- Sierra, A. P., da Silveira, A. D., Francisco, R. C., Barretto, R. B., Sierra, C. A., Meneghelo, R. S., Kiss, M. A., Ghorayeb, N., and Stein, R. (2016). Reduction in post-marathon peak oxygen consumption: sign of cardiac fatigue in amateur runners? *Arq. Bras. Cardiol.*, 106: 92-96.
- Sjödén, B. and Jacobs, I. (1981). Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int. J. Sports Med.*, 2: 23-26.
- Sjödén, B. and Svedenhag, J. (1985). Applied physiology of marathon running. *Sports Med.*, 2: 83-89.
- Soeder, G., Golf, S. W., Graef, V., Temme, H., Brüstle, A., Róka, L., Bertschat, F., and Ibe, K. (1989). Enzyme catalytic concentrations in human plasma after a marathon. *Clin. Biochem.*, 22: 155-159.
- Solberg, G., Robstad, B., Skjønberg, O. H., and Borchsenius, F. (2005). Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *J. Sports Sci. Med.*, 4: 29-36.
- St Clair Gibson, A., Baden, D. A., Lambert, M. I., Lambert, E. V., Harley, Y. X., Hampson, D., Russell, V. A., and Noakes, T. D. (2003). The conscious perception of the sensation of fatigue. *Sports Med.*, 33: 167-176.
- Støa, E. M., Støren, Ø., Enoksen, E., and Ingjer F. (2010). Percent utilization of VO₂max at 5-km competition velocity does not determine time performance at 5 km among elite distance runners. *J. Strength Cond. Res.*, 24: 1340-1345.
- Støren, Ø, Ulevåg, K., Larsen, M. H., Støa, E. M., and Helgerud, J. (2013). Physiological determinants of cycling time trial. *J. Strength Cond. Res.*, 27:

Sports Med. Phys. Fitness, 56: 782-788.

Tjelta, L. I., Tjelta, A. R., and Dyrstad, S. M. (2012). Relationship between velocity at anaerobic threshold and factors affecting velocity at anaerobic threshold in elite distance runners. *Int. J. Appl. Sports Sci.*, 24: 8-17.

Twist, C. and Highton J. (2013). Monitoring fatigue and recovery in rugby league players. *Int. J. Sports Physiol. perform.*, 8: 467-474.

Vassilis, P., Vassilios, B., Vassilis, M., Athanasios, J. Z., Vassilis, T., Christina, K., and Yiannis, K. (2008). Isokinetic eccentric exercise of quadriceps femoris does not affect running economy. *J. Strength Cond. Res.*, 22: 1222-1227.

Warren, G. L., Lowe, D. A., and Armstrong, R. B. (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med.*, 27: 43-59.

Wasserman, K., Whipp, B. J., Koyle, S. N., and Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J. Appl. Physiol.*, 35: 236-243.

Whyte, G., George, K., Shave, R., Dawson, E., Stephenson, C., Edwards, B., Gaze, D., Oxborough, D., Forster, J., and Simson, R. (2005). Impact of marathon running on cardiac structure and function in recreational runners. *Clin. Sci.*, 108: 73-80.

山地啓司・橋本一隆・橋爪和夫 (2000). トレッドミル走における持続時間と生理学的応答の変動. *体育学研究*, 45: 15-23.

Zouhal, H., Jacob, C., Groussard, C., Moussa, E., Delamarche, P., and Gratas-Delamarche, A. (2006). Effect of marathon running on aerobic performances in highly trained athletes. *Science and Sports*, 21: 303-305. (French with English abstract)

謝辞

本博士論文の作成にあたり、ご指導いただきました筑波大学の鍋倉賢治教授に深く感謝の意を表します。先生には、実験実施からデータのまとめ方、論文執筆に至るまで、私が筑波大学大学院博士後期課程に進学してからの研究の全過程を指導していただきました。

ご多忙の中、筑波大学の木塚朝博教授、前田清司教授、仙石泰雄助教には副査を快く引き受けていただきました。先生方には、データの解釈、論文執筆にあたっての表現方法やまとめ方の工夫など、あらゆる面においてご指導いただきました。

富山大学の山地啓司名誉教授、鹿屋体育大学の金久博昭教授、山本正嘉教授、宮本直和准教授、埼玉県立大学の八十島崇講師に謝意を捧げます。先生方には、埼玉県立大学や鹿屋体育大学大学院修士課程の在学時に研究指導のみならず数々の温かい激励の言葉をいただき、大変励みになりました。

鍋倉研究室の皆様にも多くのご協力とご助言をいただきました。また、鹿屋体育大学の平田浩祐氏、立命館大学の森寿仁氏には、研究を進めるにあたり多大なるご協力をいただきました。この場をお借りして心よりお礼申し上げます。

本論文の実験および調査を行うにあたり、数多くの対象者の方にご協力をいただきました。皆様の存在が私の研究への活力となりました。深く感謝いたします。

最後に、私がこれまで研究を続けられるように支援してくれた両親に心より感謝いたします。